

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра метрологии стандартизации и сертификации

В.А. НИКИТИН
С.В. БОЙКО

«МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ»

Издание второе, переработанное и дополненное

Рекомендовано УМО вузов по университетскому политехническому
образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений

Оренбург 2004

УДК 389 (075.8)
ББК 30.10я7
Н-62

Рецензенты

Заведующий кафедрой метрологии и систем качества Пензенского государственного университета доктор технических наук, профессор Г.П. Шлыков, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством Самарского государственного аэрокосмического университета член корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор В.А. Барвинок

Никитин В.А., Бойко С.В.

Н-62 Методы и средства измерений, испытаний и контроля:

Учебное пособие - 2-е изд. перераб. и доп.- Оренбург ГОУ ОГУ, 2004. - 462 с.

ISBN 5-7410-0692-2

В учебнике описаны основные методы измерений и средства измерений, испытаний и контроля. Изложены ключевые понятия и математические модели элементов измерительного процесса. Подробно рассмотрены методы и алгоритмы расчета характеристик погрешностей многократных и однократных измерений.

Для студентов вузов специальности метрология, стандартизация и сертификация пищевых производств и услуг, связанных с пищевыми продуктами и сырьем для пищевого производства.

ББК 30.10я7

Н $\frac{2004010000}{6Л9-01}$

© Никитин В.А., Бойко С.В., 2004

©ИПК _____ ГОУ ОГУ _____, 2004

ISBN 5-7410-0692-2

Предисловие ко второму изданию

В процессе производственной и познавательной деятельности человеческого общества возникает множество практических и теоретических задач, для решения которых необходимо располагать количественной информацией о том или ином свойстве объекта материального мира (процесса, вещества, детали машины, явления природы и т.д.). Основным способом получения той или иной информации являются измерения, при реализации которой необходимо применить определенные правила, чтобы получить результат измерения с большей или меньшей точностью, отражающие свойства объекта или показатели его качества. Такая информация называется *измерительной информацией*.

Студенты инженерных специальностей ВУЗов, начиная с начальных курсов, работают в лабораториях по измерениям профилирующих знаний специальных кафедр. Лабораторные работы по измерениям дают практическую возможность тщательно изучить сущность теоретических основ измерения, методов измерения и конструкции различных средств измерения. Результаты любых измерений неизбежно содержат неточности – неопределенности типа А и Б (погрешности), как бы тщательно и на каком бы высоком уровне они не выполнялись. Известно, что абсолютно точных измерений не существуют принципиально, так как даже эталоны государственной важности имеют вышеуказанные неопределенности типа А и Б. Именно поэтому успешное усвоение теоретического материала в ходе лабораторных работ, усвоение методов и средств измерений, методов и средств испытаний, методов и средств контроля, приобретение в этом процессе практических навыков, предполагает также прочное усвоение современных методов математической обработки результатов измерений через анализ объектов измерения, выбора средства измерения, испытания или контроля, анализа и оценивания неопределенностей типа А и Б (погрешностей).

Подготавливаясь к будущей самостоятельной работе по профилю своей специальности, студенты постепенно понимают, что сегодня измерения пронизывают все сферы человеческой деятельности. С измерениями связана деятельность инженера-конструктора, инженера-технолога, инженера-контролера, инженера-испытателя, инженера-исследователя и инженера-производственника. Все эти специалисты обязаны иметь ясное представление о возможностях и оснащенности производства измерительной техникой, чтобы обеспечить взаимозаменяемость деталей и узлов, контролепригодность разрабатываемого изделия и качество его изготовления по всем переделам и операциям на всех стадиях его жизненного цикла. Измерительная информация является основой для принятия технических и управленческих решений при производстве и испытаниях продукции, оценивании ее технического уровня, аттестации и сертификации качества. И, конечно, знание современных правил, законов РФ, норм и регламентов в области измерений является обязательной функцией для специалистов управления и организации производства.

Результат измерения имеет серьезное значение лишь при условии, что он сопровождается оценкой неопределенности типа А и Б (погрешности) измерения, либо дополняется сведениями, которые позволяют пользователю информации измерения оценить точность измерения самостоятельно. Кроме того, важно не только уметь выполнить измерение и оценить погрешность результата, но и так подобрать средство измерения, спланировать и осуществить процедуру измерения, чтобы была обеспечена требуемая точность или, по крайней мере, была сведена к минимуму погрешность. В этих условиях нужен единый научный и законодательный фундамент, который осуществляет на практике высокое качество измерений, независимо от того, где и с какой целью они производятся. Таким фундаментом является дисциплина прикладной метрологии – «Методы и средства измерений, испытаний и контроля».

В первой части учебника излагаются основные методы измерений, усвоение которых позволяют студенту осознанно подойти к изучению средств измерений распространенных величин. Во второй части учебника изложены средства измерений, испытаний и контроля и отличительные особенности измерений от испытаний и контрольных операций.

Изучение учебника требует от студентов знаний основ математики, особенно теории вероятностей, в объеме, который предлагается студентам технических специальностей.

Оба автора разделяют ответственность за содержание всего материала учебника. Помощь коллег дала возможность привести учебник к настоящему виду. Хочется выразить им сердечную благодарность. Авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю признательность и благодарность коллективу кафедры «Производство летательных аппаратов и управления качества» Самарского государственного аэрокосмического университета (заведующему кафедрой члену корреспонденту РАН, доктору технических наук, профессору Барвинок В.А.) и коллективу кафедры «Метрология и системы качества» Пензенского государственного технического университета (заведующему кафедрой доктору технических наук, профессору Шлыкову Г.П.), взявшим на себя труд по рецензированию рукописи и сделавшим особый ряд ценных замечаний, способствовавших улучшению содержания учебника.

Введение

Современный этап развития человечества характеризуется огромным потоком информации, циркулирующей во всех сферах его деятельности. Если в середине 19-го века увеличение объема информации за 50 лет происходило вдвое, то в 20-м веке, до 80-х годов, его удвоение происходило примерно за 20 лет. После 80-х этот показатель стал меняться в течение 3-4-х лет, а в 21 веке это удвоение происходит так стремительно, что такие сроки назвать будет некорректно, так как информационный поток просто огромен во всех отраслях жизненного цикла человечества! Поэтому 21 век назван веком информации.

В процессе различной деятельности людей, индивидуально каждого человека и во взаимодействии сообщества возникает множество задач, для решения которых необходимо иметь достаточное количество и качество информации о том или ином свойстве объектов материального мира (явления, процесса, вещества, параметра продукции, детали или машины в целом и т.д.).

Одним из главных способов получения информации – измерения и методы измерений. Информация о свойствах и качественных характеристиках объектов, полученных с помощью измерений, называется *ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ*. Студенты инженерных специальностей высших учебных заведений, начиная занятия с первого семестра, из школьного багажа знаний, знают, что такое размерность и единицы измерений, но на элементарном уровне.

Результат любого измерения заслуживает внимания лишь при условии, что он имеет оценку погрешности измерения, либо информацию оценки точности измерения самостоятельно. Курс «Методы и средства измерений, испытания и контроля» читается после освоения студентами курса «Теоретическая метрология» и поэтому нет необходимости повторять главные сведения и формулировка из метрологии. Однако есть один момент, о котором необходимо поговорить, исходя из последних событий в мире, о практической метрологии и ее прикладных учебных дисциплин, к которым и относится курс «Методы и средства измерений, испытаний и контроля». Речь идет о замене термина «погрешность измерений» на «неопределенность измерений» в практике производственной и общественной жизни Российской Федерации. Полемика в МОЗМе и в ГОССТАНДАРТЕ РФ еще идет, но в перспективе уже ясно, что студенты все отчетливее должны привыкать к терминам «неопределенность измерений», если мы хотим быть на уровне взаимопонимания с зарубежными странами, с требованиями международного рынка и культурными связями с народами мира.

1 Предмет, задачи и содержание дисциплины

Что такое - «Теория Постановки Задачи»? Любая задача может быть разложена на две составляющие: внутреннюю задачу и внешнюю задачу. Решать задачу приходится на уровне как внешней, так и внутренней. Обычно ученые говорят: «Вопрос решается на уровне внешней задачи, или на уровне внутренней задачи» Что это значит? В условие задачи постановщик ее включает необходимое и достаточное количество исходных данных и оговаривает их условия значимости по граничным параметрам их стабильности или не стационарности, переменные или постоянные их величины и т.д. Из физики, математики это Вам должно быть известно, но все-таки так это или не так, а методы и средства измерений, испытаний и контроля требуют педантичную, беспощадную, жесткость подхода к постановке и, разумеется, к решению задачи. Если Вы решаете задачу и безукоризненно выполняете все условия границ, без допущений, применяете аналитику или приближенные методы расчетов в пределах условий, то считается, что Вы решаете ее на уровне внутренней задачи. Если Вы выходите за рамки допущений и граничных условий, а применяете известные закономерности в науке, действующие в пределах заранее оговоренных граничных условий, то Вы выходите из внутренней задачи и внедряетесь в уровень внешней задачи. Тем самым Вы перед собой, вольно или не вольно, ставите задачу переходных процессов стационарных или случайных нестационарных событий, не подозревая о трудностях получить достоверный результат, попадаете в заведомую ловушку. Поэтому, выходя во внешнюю задачу надо осознанно это знать и помнить, что занимаетесь научным экспериментом, а оправдано ли это с точки зрения экономики, это уже другой вопрос.

О литературе! Можно читать все типы и виды литературы и поднимать уровень своей культуры, интеллект и т.д., но есть Законы и НТД, знание которых не только повышают уровень культуры, а являются гражданской и должностной обязанностью, иногда тесно связанной с уголовной ответственностью. Поэтому у метрологов обычно говорят, что литературу читай, а законы и государственные стандарты исполняй!

На страницах журнала «Законодательная метрология» №2 за 1995 год в статье г. В.А. Брюханова, Н.П. Мифа открыта рубрика обсуждения Закона РФ «Об обеспечении единства измерений» в статье «ГСИ. Методики выполнения измерений» - важное мероприятие для реализации закона РФ «Об обеспечении единства измерений» с 9-12, не обсудить сущности, которой мне кажется нельзя. Хотя эта статья не закончена, а продолжается в №4 за 1995 год в статье В.А. Брюханова «Региональные семинары по реализации закона Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» с 15-19, уже сейчас ясно, что авторы затрагивают вопиющие вопросы повседневной жизни нашего общества во взаимосвязях с обществами зарубежных стран со всеми проблемами терминологии. Известна истина, если хочешь, чтобы был понят другими, то говори на общепонятном языке и применяй взаимосогласованную

терминологию. Настоятельно рекомендуем всем Вам постоянно просматривать журнал «Законодательная метрология» и читать все то, что западет в «душу», уверен в успехах Вашего последующего «ренеме».

«МЕТОДЫ» - что это такое? Необходимо обратиться к межгосударственному стандарту РМГ 29-99 «Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Метрология. Основные термины и определения», который был принят взамен ГОСТ 16263-70.

Таким образом действует РМГ 29 – 99, а так как ГОСТ 16263 - 70 отменен, то применять его нельзя, однако мы еще долго будем прибегать к нему, с точки зрения познавательной направленности недавних споров, применимости в старой литературе со ссылками на него.

Метод - это алгоритм, порядок элементарных операций действия или изложения сути проблемы в последовательном по логике физических законов природы в порядке следования друг за другом. Этому соответствует все многообразие жизни, мы продолжаем его изучать и видоизменять в процессе познания. Далее уже начинается философия! «Метод измерения - совокупность приемов использования принципов и средств измерений»- определение из стандарта ГОСТ 16263-70. Согласно РМГ 29-99, «Метод измерения – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений».

Чтобы изучать эти методы и средства измерений, испытаний и контроля, необходимо, прежде всего, определиться о том, что является первоосновой метрологии! Мы обязательно должны начать с Закона РФ «Об обеспечении единства измерений». Обсуждение любых проблем, связанных с единством измерений, целесообразно начинать с упоминания основных метрологических истин или, если, осторожно выражаясь, с утверждений, которые на сегодняшний день нам представляются как истины (известно, что все в мире носит относительный характер, сегодня истина, а завтра ее заменяет другая истина!)), приводим их в редакции Брюханова В.А. –журнал «Законодательная метрология» №2 за 1998 год в статье «Единство измерений: прекрасная мечта, суровая реальность и оптимистический финал», часть 1-я, с 43-49 и продолжение в № 4 за 1998 год – часть 2-я, с 6-12.

1.1 Метрологические истины

Истина первая. Погрешность измерений - отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины /2/. Истинные значения измеряемых величин идеальным образом отражают, как отмечается в работе «Основы метрологии» Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. о понятии - физических величин, свойства данного объекта, как в количественном, так и в качественном отношении. Они не зависят от средств нашего познания, от устройства государственного строя, деятельности президента и т.д., а являются той «абсолютной истиной», к которой мы стремимся, и познать которую нам так, и не дано. Вот почему мы в нашей жизни вместо истинных значений величин оперируем действительными значениями. Под действительными

значениями физических величин принято понимать их значения, найденные экспериментом и настолько приближенные к истинным, что для конкретной цели они могут быть достаточно использованы вместо истинных. Вопросы о необходимой степени приближения являются самыми трудными вопросами теории в метрологии, а курса нашего они касаются чисто факультативно, поэтому нам остается Вас адресовать к дисциплине - «теоретическая метрология», где эти вопросы будут изучаться подробно.

Истина вторая. Все наши сведения о погрешностях измерений носят заведомо приближенный характер, так как истинные значения физических величин необходимо называть действительными значениями величин. Поэтому принято говорить об оценивании погрешности измерений как о процедуре действий в процессе измерений, об оценках погрешности измерений как о результатах этих действий.

Истина третья. Погрешность измерения есть объективное и неизбежное ЗЛО. Что это значит? Это означает то, что из-за погрешности измерений страдают простые люди любой страны, страдают организации, предприятия, экономика страны, экология нашей жизни и иногда даже существующий правопорядок в стране! Обвесы в магазине при покупках продукции! Ошибки первого и второго рода из-за погрешности измерений при контроле измерений! Экологические неточности и погрешности в измерениях вредных выбросов в атмосферу ставят под удар безопасность жизни человечества на земле! Эти примеры можно перечислять бесконечно.

Истина четвертая. Знание погрешности является в то же время не только злом, но и благом.

Мы можем, на основании знаний погрешности:

- разумным образом выбирать средства измерений и методики выполнения измерений для решения огромного круга измерительных задач;
- сопоставлять СИ и МВИ по важнейшему критерию - точности измерений;
- сопоставлять результаты измерений, полученные в разных условиях, с помощью различных методов и СИ;
- оценивать достоверность результатов измерений с испытаниями и контролем продукции при оценке ее качества и т.д.

Истина пятая. Обязательным условием знания погрешности измерений является наличие эталонов единиц тех величин, которые измеряются. Под эталоном единицы величины понимается СИ или комплекс СИ, предназначенных для воспроизведения и хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИ. Одной из центральных статей Закона РФ «Об обеспечении единства измерений» является статья 9, гласящая, что измерения должны выполняться в соответствии с аттестованными в установленном порядке методиками. Для выполнения этого требования был создан ГОСТ Р 8.563 -96 «ГСИ. Методики выполнения измерений». Под действие этого стандарта подпадает огромный массив измерительных процедур, для которых погрешность результата измерений не сводится к

погрешности применяемого средства измерений, а еще и к погрешности измерений параметров изделий производства. Дело в том, что СИ не создаются сами для себя. Они существуют для обслуживания жизнедеятельности общества во всевозможных областях жизненного цикла последнего. Поэтому мы вынуждены кратко остановиться на вопросе о том, что тотальное внедрение МВИ в жизнь обращения СИ и методов их использования в сферах деятельности Российской Федерации в текущем моменте жизни будет крайне противоречивым. В процессе разработки МВИ и их согласования для производств, в ходе аттестации, метрологического контроля и надзора, будут возникать конфликтные ситуации между региональными ЦСМ, Госстандартом Российской Федерации и конкретными организациями Российской Федерации, организующими какую либо измерительную практику. Например, в области испытаний и контроля пищевой продукции и продовольственного сырья, в среднем только каждый пятый стандарт «дотягивает» в настоящее время до требования обеспечения единства измерений, т.е. Закона и стандарта на МВИ! Таким образом, для многих процедур испытаний и контроля качества продукции питания и сырья вопрос достоверности результатов измерений, испытаний и контроля фактически остается открытым, и, следовательно, применение стандартов, регламентирующих испытательные процедуры и не соответствующих требованию обеспечения единства измерений, не позволяет гарантировать достижение цели, сформулированной в Законе, т.е. защиту прав и законных интересов граждан Российской Федерации от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений. Вот, что значит МВИ и ГОСТ Р 8.563-96! Чтобы не затрагивать проблем других предметов, мы ограничимся сказанным и перейдем к определению понятий процедур измерений.

2 Классификация измерений (Виды измерений)

Все измерения подразделяются на прямые измерения и косвенные измерения. Прямые измерения - измерения, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно. Например, измерение массы на весах, температуры ртутным или спиртовым термометром, геометрических измерений с помощью линейно-угловых СИ и т.д.

Косвенные измерения - определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. Например, нахождение температуры по реакции термоЭДС в термопаре, удельного электросопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения и т.д.

Из прямых и косвенных измерений вытекают понятия:

- **совокупные измерения** - проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях. Например, измерение массы отдельных гирь сравнением масс сочетания гирь;

- **совместные измерения** - проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Например, измерение, при которых электросопротивление при $T=20^\circ\text{C}$ и температурные коэффициенты измерительного резистора находят по данным прямых измерений его сопротивления при различных температурах;

- **абсолютное измерение** - измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант;

- **относительное измерение** - измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную;

- **принцип измерения** - физическое явление или эффект, положенное в основу измерения. Основывается на известных законах физики и химии;

- **методы измерения** – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с использованным принципом измерений;

- **средство измерения** - техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящие и (или) хранящие единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в условиях установленной погрешности) в течение известного интервала времени;

- **мера** - средство измерения, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Например, однозначная мера - гири, многозначная

мера – штриховая мера длины, набор мер – набор концевых мер длины, магазин мер – магазин сопротивлений.

3 Области измерений

Классификация измерений по областям измерений:

- геометрические измерения:
 - а) линейно-угловые измерения (линейки, штангенциркули, микрометры);
 - б) геодезические измерения (нивелиры, теодолиты).
 - механические измерения:
 - а) измерения твердости материалов:
 - 1) измерения твердости и других характеристик стали (Пресс Бри Неля);
 - 2) измерение твердости и других характеристик цветных металлов;
 - 3) измерение твердости и других характеристик каучука и резиновых изделий, полиуретановых заменителей резин;
 - б) измерение массы материалов (весы, динамометры, гири).
 - в) измерение плотности материалов:
 - 1) измерение плотности жидкостей;
 - 2) измерение плотности газообразных материалов.
 - 3) измерение влагосодержания материалов.
 - г) измерение времени.
 - д) измерение скоростных параметров физических величин:
 - 1) измерение скорости движения материальных тел и веществ;
 - 2) измерение скорости движения материальных явлений.
 - измерение теплоты:
 - а) измерение температуры вещества или тела при прямых измерениях;
 - б) измерение температуры вещества или тела при косвенных измерениях;
- Измерения комплекса - температуры, скорости движения, расхода через определенное сечение вещества (горячей воды, пара, других горячих продуктов (нефтепродуктов, спиртов и продуктов на его основе, молокопродуктов, расплавленных металлов и др.).
- измерение расхода.
 - измерение давления.
 - измерение вязкости материалов и жидкостей.
 - измерение электрических величин:
 - а) измерение электрического тока;
 - б) измерение электрического напряжения;
 - в) измерение электрического сопротивления;
 - г) измерение электрической мощности;
 - д) измерение расхода электроэнергии.

- измерение величин магнетизма.
- измерение колебаний механических величин.
- измерение колебаний электрических величин.
- измерение акустики.
- измерение оптических величин.
- измерение лучистой энергии:
 - а) измерение излучений звуковой частоты;
 - б) измерение инфракрасных излучений;
 - в) измерение ультразвуковых излучений;
 - г) измерение световых излучений;
 - д) измерение излучений атомной и ядерной энергии.

Эта классификация не претендует на «истину в последней инстанции», а есть нечто обще смысловое образование, имеющее, безусловно, спорный характер, но Вам не следует из-за этих разночтений в будущем слишком сильно сокрушаться, так как строгой классификации как у нас в стране, так и за рубежом нет! Казалось бы, классификация измерений и СИ, вытекающая из Государственного Реестра на СИ, есть образец точности и строгости, но это как раз и не так. Классификация Госстандарта Российской Федерации (далее Госстандарта РФ) не могла быть изолирована от отраслей промышленности бывшего СССР, поэтому Вам будут в учебниках попадаться различные классификации, отличающиеся друг от друга, в том числе и от той, которая Вам сейчас была предложена. Главное необходимо усвоить принцип, так как в чередовании строгость здесь не является определяющей!

4 Величина, физические измерения

Для определения следующего материала - характеристики измеряемой величины или параметра, необходимо определиться с термином **«величина»**. Здесь так же есть спорность в определении. По ГОСТ 16263-70 термина – «величина» без дополнительного прилагательного нет, есть физическая величина, но об этом чуть ниже. В соответствии со статьей в журнале «Законодательная метрология» N 4 за 1998 год, с 52-54, автора М.Н.Селиванова «О понятии **«величина»** в метрологии», термин «величина» широко распространен, он как бы «оскоми́на» на зубах каждого метролога. Строго говоря, **«величина»** - определения родового понятия нет как в отечественной метрологической литературе и в НТД, так и в международных метрологических словарях. Однако в Законе Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» фигурирует понятие «единица величины», а не «единица физической величины» как по стандарту, следовательно, законодательно Госстандарт РФ, как автор закона, ставит в качестве первичного термин «величина», а затем ее определение по принадлежности. Таким образом, среди множества величин могут быть выделены величины материального мира и величины идеальных моделей реальности. Классификация величин приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Классификация величин

ВЕЛИЧИНЫ		
МАТЕРИАЛЬНОГО МИРА		ИДЕАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ РЕАЛЬНОСТИ
ФИЗИЧЕСКИЕ	НЕ ФИЗИЧЕСКИЕ	МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
(Применяемые в физике и смежных с нею науках)	(Применяемые в психологии, социологии, экономике и др.)	(Применяемые в чистой математике)
ИЗМЕРЯЕМЫЕ	Оцениваемые или вычисляемые	Вычисляемые и выводимые аналитически

Автор статьи предлагает термин **«измеримая величина»**, т.е. величина, которая в принципе измерима (имеется единица измерения, величинами, что имеет существенное значение, если она материализована при помощи эталона и хранима средством измерения).

Действительно, ведь в метрологии является именно измеримость величины главным, а не то, как ее называть! Он предлагает пересмотреть

ГОСТ 16263-70, РМГ 29 - 99 и сменить термин физическая величина как первичный на термин измеримая величина, но это уже практика будущего. Он также предлагает ввести в практику понятие «оцениваемая величина» - для тех

величин, для которых еще не удалось создать единицу и воспроизвести ее в эталоне. Это даст возможность провести четкие границы между измеримыми и оцениваемыми величинами в науке «метрология», а также в прикладных частях – «Методы и средства измерений, испытаний и контроля»!

Теперь можно сравнить:

1) по ГОСТ 16263-70 - Физическая величина - свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящих в них процессах), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта, с тремя примечаниями - их приводить здесь не надо, поэтому адресуем Вас к вышеуказанному стандарту;

2) по предложению автора статьи - Измеримая величина - величина, для которой созданы условия измеримости: - возможность выделения среди других величин; - возможность установления единицы измерений; - возможность материализации единицы измерений - ее воспроизведение и хранение при помощи эталонов и других средств измерений; возможность сохранения неизменным размера единицы (в пределах установленной погрешности) как минимум на срок, необходимый для одного измерения.

Примечания

1 Генеральной конференцией мер и весов принята и установлена международным стандартом ИСО МС 31 система физических величин (СИ). Она состоит из основных и производных величин, при этом каждая производная величина входит в указанную систему посредством уравнения связи между величинами.

2 Физические величины, как правило, являются измеримыми величинами. Когда для физической величины нет единицы измерения, ее количественная оценка может быть получена по условной шкале (шкалам).

3 Оцениваемая величина - величина (для которой еще не созданы условия измеримости), количественную оценку которой получают по условной шкале (шкалам) или каким-либо правилам.

В соответствии с РМГ 29-99, физическая величина – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Классификация измерений по диапазонам значений измеряемых величин в общем, виде не может быть приведена в отдельности от области и вида измерений, а вытекает из типа средств измерений по его собственному стандарту и в составе этого типа есть подразделение по диапазонам значений измеряемых величин. Например, штангенинструмент - тип СИ из линейно-угловых измерений, а в его составе различные штангенциркули с диапазоном измерений - (от 0 до 125 мм. - ШЦ1, от 0 до 160 мм. – ШЦ11 и т.д.). В процессе измерений всегда присутствует фактор времени, и постоянство измеряемой величины в зависимости от времени (постоянная или переменная величина). Простые измерения зависят от времени незначительно - только то время, которое необходимо затратить на производство замеров и регистрацию результатов наблюдения при измерении. Сложные измерения переменных

величин зависят от времени в одномерном и многомерном состоянии. Что это значит? Это означает следующее:

- есть переменный процесс измеряемой величины стационарный, т.е. не изменяющий своих параметров переменности в течение длительного времени (переменный электрический ток частотой 50 Гц с девиацией частоты в пределах $\pm 0,5 \%$);

- есть переменный процесс измеряемой величины нестационарный, т.е. случайные события в виде частотных колебаний, не имеющих стационарных признаков в течение времени, с математическим ожиданием, представляющим собой также неизвестную переменную функцию. Такие измерения производятся с помощью математической статистики по теории случайных нестационарных процессов. Это касается определения областей применения по специфике измерительной задачи и именно в таких случаях без строгого подхода о постановке задачи обойтись нельзя!

К моделям измеряемых свойств объектов и явлений измеряемых величин относятся понятия скаляр, вектор, тензор, детерминированный или случайный процессы изменения величин при их измерении в зависимости от времени.

5 Методы измерений

Методы измерений подразделяются на:

- методы непосредственной оценки;
- методы сравнения.

Методы сравнения подразделяются на:

- а) методы непосредственного сравнения с мерой;
- б) методы опосредованного сравнения с мерой.

Методы непосредственного сравнения с мерой – методы измерения в которых измеряемую величину сравнивают непосредственно с величиной, воспроизводимой мерой, а опосредованного сравнения с мерой – методы измерения в которых измеряемую величину сравнивают через косвенную величину, воспроизводимую мерой с последующим пересчетом значений с соответствующей зависимостью непосредственной величины с косвенной.

В свою очередь методы непосредственного сравнения с мерой, а также и методы опосредованного сравнения с мерой, подразделяется на:

- 1) дифференциальный метод сравнения с мерой;
- 2) нулевой метод сравнения с мерой;
- 3) метод замещения при сравнении с мерой;
- 4) метод совпадения при сравнении с мерой;
- 5) метод противопоставления при сравнении с мерой.

Каждый метод измерения имеет обобщенную структурную схему при прямом преобразовании и наличии компенсации, с использованием меры и без нее, имеет определенные условия применения или должен иметь их, должен иметь возможность оценки на точность. Обобщенная схема простого процесса измерения представлена на рисунке 5.1.

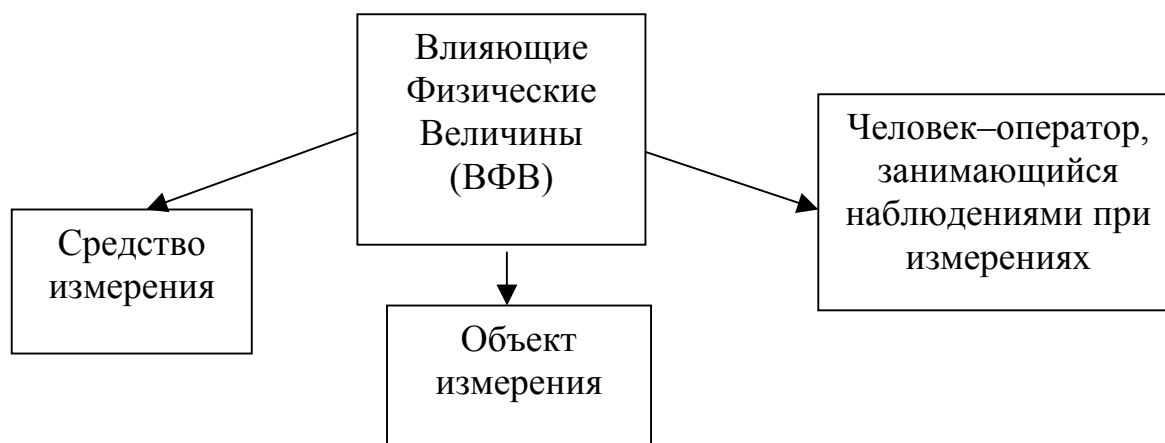


Рисунок 5.1 - Обобщенная схема простого процесса измерения

Для организации процесса измерений инженер или простой рабочий должен обладать необходимым элементарным запасом знаний о том, как это делается! Для этого необходимо уметь организовать выбор метода измерения! Выбор метода измерений определяется принятой моделью объекта измерения

(ОИ) и доступными или имеющимися в своем распоряжении средствами измерений (СИ). Таким образом, метод измерений - прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с мерой, т.е. с ее единицей (или шкалой) в соответствии с реализованным принципом измерений. При выборе метода измерений необходимо добиться того, чтобы погрешность метода измерений, т.е. составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятых модели и методов измерений (иначе, теоретическая погрешность), не сказывалась заметно на результирующей погрешности измерения, т.е. не превышала 30 % от нее. Перечисленные выше методы измерений требуют разных затрат денежных средств и времени на выполнение наблюдений при измерениях. Поэтому необходимо учитывать требования точности и временные зависимости измеряемых величин. Измерения измеряемых параметров модели в течение времени измерения (выполнение цикла наблюдений), как правило, не должно превышать 10 % от заданной погрешности измерения. Если возможны альтернативы, учитывают и экономические соображения: ненужное завышение точности модели и метода измерения приводит к необоснованным затратам, тоже относится и к выбору СИ. Из этого вытекает, что выбор метода и СИ практически происходит одновременно. Выбор СИ и вспомогательных устройств. Выбор СИ определяется измеряемой величиной, принятым методом измерений и требуемой точностью результата измерений (нормами точности из ОИ, при этом учитывать также диапазон измеряемой величины и СИ, условия измерений, эксплуатационные качества СИ, их стоимость).

Основное внимание уделяют погрешностям СИ. При этом добиваются выполнения условия /5/

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{мод}} + \Delta_{\text{м}} + \Delta_{\text{си}} + \Delta_{\text{о}} + \Delta_{\text{усл}} \leq \Delta_{\text{Д}} , \quad (5.1)$$

где Δ_{Σ} - предельные погрешности;

$\Delta_{\text{мод}}$ - модели измерений;

$\Delta_{\text{м}}$ - метода измерений;

$\Delta_{\text{си}}$ - средства измерений; Она состоит из ряда составляющих по МХ самого СИ, главная и которых является предельно допустимой погрешностью СИ.

$\Delta_{\text{о}}$ - оператора;

$\Delta_{\text{усл}}$ - дополнительные погрешности, обусловленные воздействием влияющих факторов условий измерений;

$\Delta_{\text{Д}}$ – предельно допускаемая погрешность результатов измерений.

МХ – метрологические характеристики СИ, состоящие из составляющих – смотри ГОСТ на тип любого СИ.

Критерий - Δ_{Σ} выбора СИ достаточно надежен, но дает завышенную на от 20 до 30 % оценку суммарной погрешности измерения. Если такой запас по точности не допустим, суммирование составляющих Δ_{Σ} следует произвести по

формулам, приведенным в статистической методике, которую мы будем рассматривать позже. Образцовые средства измерений (ОСИ), термин по старому, а теперь - **эталонные средства измерений (ЭСИ)**, для проведения метрологической аттестации или поверки выбирают в соответствии с указаниями в НД на поверочные схемы и (или) методики поверки (аттестации). После выбора метода и СИ определяется необходимость разработки методики выполнения измерений (МВИ) или применения уже утвержденной, или применения простой инструкции по эксплуатации на СИ.

6 Подготовка к измерениям

При подготовке к измерениям оператор должен:

1) ознакомиться с МВИ и последовательностью выполнения операций; проверить наличие необходимого комплекта СИ, вспомогательных материалов. Провести анализ объекта измерения и СИ для измерения – в процессе анализа, определить коэффициент точности предполагаемых измерений, т.е. отношение допустимых пределов измерения к абсолютной погрешности выбранного средства измерений;

2) убедиться в том, что основные и вспомогательные СИ имеют действующие свидетельства поверке и калибровке (метрологической аттестации) или поверительные клейма, а вспомогательные устройства прошли регламентное обслуживание;

3) выполнить операции по созданию необходимых условий измерений, включая требования безопасности;

4) подготовить ОИ (почистить) и создать необходимые по НД условия измерений (испытаний) - установить в рабочее положение, включить питание, охлаждение, прогреть до рабочих параметров испытания и т.д.;

5) опробовать СИ. Проверить действие органов управления; регулировки, настройки и коррекции. Если СИ снабжены средствами самоконтроля (тестирования), выполнить соответствующие операции (это относится к автоматизированным ИС и ИИС);

6) провести два - три пробных наблюдения и сравнить результаты с ожидаемыми измерениями.

При неопределенно большом расхождении результатов проверить, где ошибка и проанализировать причины, а затем их устранить

Если необходимо строго соблюсти условия по п.3, то эти условия должны соответствовать следующим требованиям:

- 1) температура для всех видов измерений – 293 К (20 °С);
- 2) давление окружающего воздуха для измерения ионизирующих излучений, теплофизических, температурных, магнитных, электрических, давлений различных продуктопроводов, параметров движения и т.д. - 100 кПа (750 мм. рт. ст.);
- 3) то же для остальных видов измерений - 101 кПа (760 мм. рт. ст.);
- 4) относительная влажность воздуха для измерений: линейных, угловых, массы, спектроскопии – 58 %;
- 5) то же, для измерений электрического сопротивления – 55 %;
- 6) то же, для измерений температуры, силы, твердости, переменного электрического тока, ионизирующих излучений, параметров движения – 65 %;
- 7) то же, для остальных видов измерений 60 %;
- 8) плотность воздуха - 1,2 кг/м³;
- 9) ускорение свободного падения - 9,8 м/с²;

- 10) магнитная индукция, магнитное поле, напряженность электростатического поля для измерения параметров движения - 0;
- 11) то же, для остальных видов измерений - соответствует характеристикам поля Земли в данном районе, регионе страны.

7 Погрешности измерений

Погрешностью измерения называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой физической величины. Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, то при количественной оценке погрешности пользуются действительным значением физической величины. Это значение находится экспериментальным путем и настолько близко к истинному значению, что для поставленной задачи может быть использовано вместо него.

По способу количественного выражения погрешности измерения делятся на абсолютные, относительные и приведенные. Абсолютной погрешностью Δ , выражаемой в единицах измеряемой величины, называется отклонение результата измерения X от истинного значения X_u , или X_o , т. е. $\Delta = X_{\text{изм.}} - X_o$;

По характеру (закономерности) изменения погрешности измерений подразделяются на систематические, случайные и грубые (промахи).

Установление числа наблюдений при измерениях: не следует приравнивать (отождествлять) понятие результат измерения с наблюдением при измерении. Наблюдение при измерении - экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерений, в результате которой получают одно значение величины (отсчет) - результат наблюдения, подлежащее обработке для получения результата измерения. Поэтому результат измерения расчетная величина.

В процессе измерения, получая результаты наблюдений, у оператора всегда присутствуют два вида погрешностей, проявляющиеся одновременно в форме суммы: $\Delta = \Theta + S(x)$; или $\Delta = \theta + \sigma$; где первая составляющая суммы это систематическая погрешность, а вторая – случайная погрешность. Таким образом, при измерениях, показания СИ при любых наблюдениях можно представить как выражение из трех определений: $X_{\text{изм.}} = X_d + \Theta + S(x)$.

Остановимся сначала на систематических погрешностях, а случайную погрешность рассмотрим ниже, т.к. это связано со статистическими методами. Систематические погрешности Δ_c – составляющие погрешности измерений, остающиеся постоянными или закономерно изменяющиеся при многократных или повторных измерениях одной и той же физической величины в одних и тех же условиях.

Различают измерения с однократными и многократными наблюдениями. Наиболее распространены (в производстве) измерения с однократными наблюдениями. Это обусловлено обстоятельствами экспериментальной или производственной необходимости (разрушение объекта измерения в процессе

наблюдения, невозможность повторения наблюдения, экономической целесообразностью и т.д.), а также, возможностью пренебречь случайными погрешностями, ситуациями, когда случайные погрешности доминируют, но доверительная граница погрешности результата измерения с однократным наблюдением не превышает допустимую погрешность измерений. Случайную погрешность считают пренебрежимо малой по сравнению с систематической (неисключенным остатком систематической погрешности - НСП) – старый термин. Термин по РМГ 29 – 99, НСП – неисключенная систематическая погрешность.

Граница НСП в практике пользования СИ часто трудно определима, тем более, когда надо определиться с тем понятием - однократное или многократное измерение необходимо произвести вот сейчас в данном, конкретном случае. В таких случаях два - три наблюдения при измерениях, имеющие различные значения и представляют причины для границ доверительной погрешности, в зависимости от предельных погрешностей метода измерения, который был Вами выбран, предельных погрешностей СИ, предельных погрешностей рабочих эталонов. Все эти составляющие систематических погрешностей входят в обозначение как N – число слагаемых и, согласно РМГ 29 – 99, определение НСП выполняется по формулам (7.1) и (7.2)

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^N |\Theta_i|, \quad (7.1)$$

где Θ_i - граница i – й составляющей неисключенной систематической погрешности при $N \leq 3$;

N - число слагаемых, состоящих из пределов допускаемых основных и дополнительных погрешностей СИ, рабочих эталонов и т. д.

При $N \geq 4$, расчет ведется по формуле (7.2)

$$\Theta_i(P) = K(P) \sqrt{\sum_{j=1}^{m=1} \Theta_j^2}, \quad (7.2)$$

Для повышения надежности таких измерений, исключая промахи, делают два или три наблюдения, и за результат измерений принимают среднее арифметическое значение результатов этих наблюдений.

Измерения с числом наблюдений $n \geq 4$ относят, условно к измерениям с многократными наблюдениями и выполняют статистическую обработку ряда результатов наблюдений для получения информации о результате измерений и о случайной составляющей погрешности этого результата. Дальнейшее рассмотрение систематических погрешностей следует вести с учетом исключения их проявлений.

8 Учет систематической погрешности и способы их уменьшения

Систематические погрешности, как правило, не проявляются при выполнении наблюдений и вычислений результатов измерений, но способны существенно исказить результаты! При разработке выбора СИ и МВИ, т.е. еще до начала измерений систематические погрешности более или менее полно исключаются (например, введением аддитивных или мультипликативных поправок). Поэтому при выполнении наблюдений и оценке результатов измерений имеют дело с не исключенными остатками систематических погрешностей - НСП. Для обнаружения НСП рекомендуется: провести измерение другим, максимально отличным от использованного, методом и сравнить результаты. Резко изменить условия наблюдений. Использовать другие экземпляры СИ, сменить оператора замеров, изменить время суток наблюдений, когда выключено технологическое оборудование. Далее провести контрольное измерение в лаборатории другого предприятия, в другом городе, в метрологическом учреждении, в котором имеются более точные СИ и МВИ. Далее выполнить теоретическую (расчетную) оценку НСП с привлечением имеющихся априорных знаний об ОИ, более точных или других моделях ОИ, методе и СИ. Все это касалось метода непосредственных измерений - метода непосредственной оценки сравнения с мерой.

Запишите формулировку методов согласно РМГ 29 – 99:

а) метод непосредственной оценки – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений;

б) метод сравнения с мерой – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой;

в) метод противопоставления - метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливаются соотношение между этими величинами;

г) дифференциальный метод – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами;

д) нулевой метод - метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Пример - Измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравновешиванием;

е) метод замещения - метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. Пример - Взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов (метод Борда);

Пусть M_x - измеряемая масса. L_1 и L_2 - длины плеч коромысла весов. Сначала измеряемую массу помещают на одну из чашек весов и уравнивают весы, помещая на другую чашку весов некоторый груз массой T (например, гирию). При этом $M_x = T L_2/L_1$. Затем снимают массу M_x и на эту же чашку помещают гири такой суммарной массы M , чтобы весы вновь уравнились. При этом $M = T L_2/L_1$. Из сопоставления этих выражений следует, что $M_x = M$ при любом отношении L_2/L_1 , причем не нужно знать значение T ;

ж) метод совпадений - метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов. Например, измерение длины с помощью штангенциркуля с нониусом основано на использовании метода совпадений, наблюдают совпадение отметок на шкалах штангенциркуля и нониуса, при измерении частоты вращения стробоскопом - наблюдают совпадения положения какой-либо марки на вращающемся объекте в моменты вспышек известной частоты. Среди перечисленных методов существует метод компенсации погрешности по знаку - предусматривающий измерение с двумя наблюдениями, выполняемыми так, чтобы НСП входила в результат каждого из них с разными знаками. Пример - измеряется ЭДС с помощью потенциометра постоянного тока, имеющего паразитную термоЭДС. Проведя два наблюдения при противоположном направлении рабочего тока в потенциометре и взяв среднее значение, получим результат, свободный от этой погрешности. Еще пример - для исключения НСП из-за вариации, гистерезиса, мертвого хода верньерных механизмов, измерения проводят при подходе к определяемому отсчету слева и справа. Результат измерения вычисляют по формуле (8.1)

$$X = (X_{\text{сл}} + X_{\text{спр}}) / 2 \quad (8.1)$$

Кроме этого - метод рандомизации (перевод систематической погрешности в случайную) заключается в такой организации измерений, при которой фактор, вызывающий НСП, при каждом наблюдении действует по разному. Например:

а) для исключения влияния магнитного поля Земли наблюдения повторяют несколько раз, поворачивая ОИ каждый раз на некоторый угол, (обычно одинаковый) относительно силовых линий поля. За результат измерений принимают среднее арифметическое из всех наблюдений;

б) метод симметричных наблюдений применяется для устранения прогрессирующих систематических погрешностей, линейно меняющихся пропорционально времени;

в) используют следующее свойство любых двух наблюдений, симметричных относительно средней точки интервала наблюдений - среднее значение линейно прогрессирующей погрешности результатов любой пары симметричных наблюдений равно погрешности, соответствующей средней точке интервала;

г) ряд наблюдений выполняют через равные промежутки времени и вычисляют среднее арифметическое значение результатов симметрично расположенных наблюдений (симметрично относительно среднего по времени наблюдения). Как было сказано, они должны быть равны. Это дает возможность контролировать в ходе измерения, соблюдается ли условие линейности возрастания систематической погрешности.

Все приведенные методы (приемы), а также методы опосредованного сравнения с мерой должны учитываться при разработках МВИ.

После применения процедуры исключения систематических погрешностей в результат измерения вводятся поправки, или одна поправка, после чего измерения называются исправленными. После определения количества составляющих остатка систематических погрешностей делается расчет НСП. Неисключенные систематические погрешности отдельных наблюдений при измерениях включают в себя значение меры, используемой при поверке или калибровке СИ и искомой сумме составляющих систематической погрешности, следовательно, среднее значение измеряемой величины при N наблюдениях можно вычислить по формуле (8.2)

$$\bar{X}_N = X_0 + \Theta + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{изм} , \quad (8.2)$$

где первый член суммы – погрешность меры;

второй – систематическая погрешность;

третий – показание СИ и случайная погрешность.

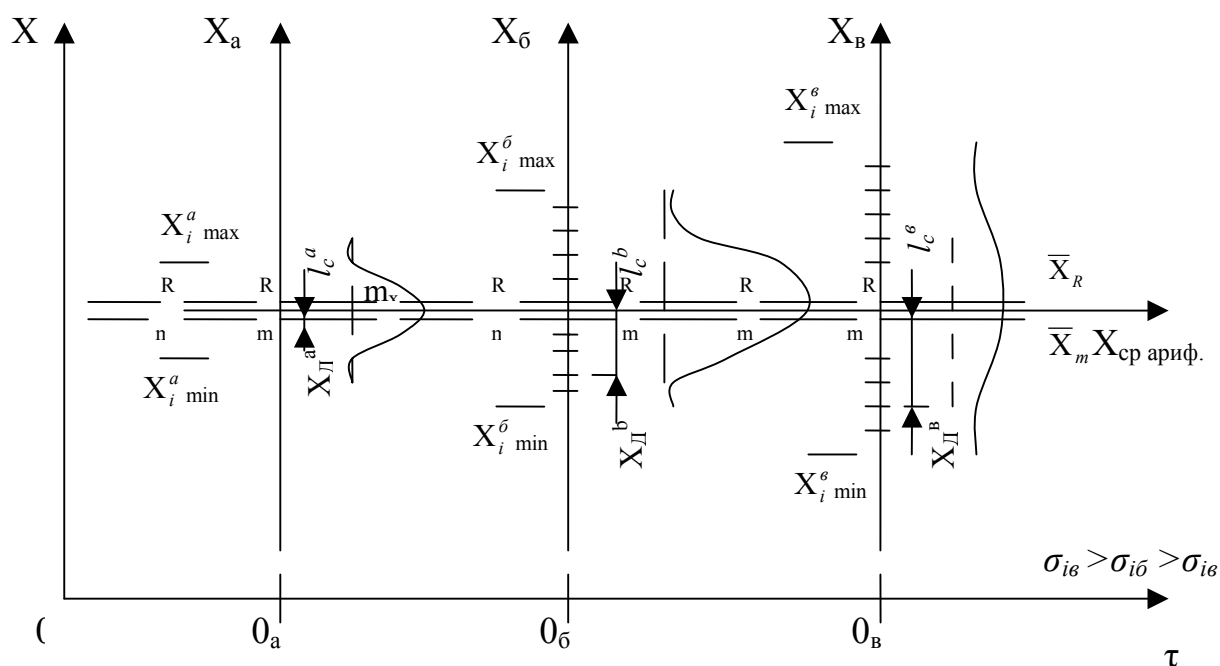
Для описания случайной погрешности, необходимо вспомнить «дифференциальную функцию распределения», математическое ожидание, дисперсию и среднеквадратическое отклонение, которые изучались в курсе теоретической метрологии.

9 Обработка результатов наблюдений и оценка погрешности

Оценку погрешности результата измерения выполняют при разработке МВИ. Источниками погрешности являются - модель ОИ, метод измерения, СИ, оператор, влияющие факторы условий измерений, алгоритм обработки результатов наблюдений. Как правило, погрешность результатов измерения оценивается при доверительной вероятности $P = 0,95$. При выборе значения P необходимо учитывать степень важности (ответственности) результата измерений. Например, если ошибка в измерении может привести к гибели людей или тяжелым экологическим последствиям значение P должно быть увеличено.

В чем заключаются различия между систематической и случайной погрешностями и почему этому различию необходимо уделять особое внимание?

Принципиальное различие между этими погрешностями в отношении их влияния на результат измерений заключается в том, что систематическая погрешность делает измеренное значение неверным, а случайная погрешность – недостоверным и вносит в результат измерения элемент вероятностной неопределенности.



e_c – систематическая погрешность;

e_{f1}, e_{f2}, e_{f3} – случайные погрешности для 3 – х наблюдений вариантов а, б, в.

Рисунок 9.1 - Числовая ось значений величины X , характеризующей различие между систематической и случайной погрешностями.

Для каждого наблюдения будет следующая структура погрешности:

$$e_1 = e_c + (-e_{f1}); e_2 = e_c + (-e_{f2}); e_3 = e_c + (+e_{f3}); /3/$$

$\sigma_{i a}, \sigma_{i б}, \sigma_{i в}$ – обозначают СКО в других источниках литературы, в данном учебном пособии СКО обозначается как $S(X)$.

9.1 Прямые измерения с многократными наблюдениями

Рассмотрим группу из «n» независимых результатов наблюдений случайной величины X , подчиняющейся нормальному закону распределения случайности событий при измерениях.

Доверительные границы НСП результата измерения $\Theta_i(P)$ вычисляют по формуле (9.1) /5/

$$\Theta_i(P) = K(P) \sqrt{\sum_{j=1}^{m=1} \Theta_j^2}, \quad (9.1)$$

где $K(P)$ - коэффициент, определяемый принятой P и числом $m1$ или N , согласно РМГ 29 – 99, составляющих НСП;

Θ_j - найденные нестатистическими методами границы j -ой составляющей НСП (границы интервала, внутри которого находится эта составляющая, определяемые при отсутствии сведений о вероятности ее нахождения в этом интервале) при $P = 0,90$ $K(P) = 0,95$, при $P = 0,95$ $K(P) = 1,1$ соответственно при любом числе слагаемых $m1$.

Далее значения сведены в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 - Значения $K(P)$ от $m1$ при $P = 0,99$

При $P = 0,99$ значения $K(P)$	
$m1$	$K(P)$
2	1,2
3	1,3
4	1,4
5	1,45
6	1,45

Если составляющие НСП распределены равномерно и заданы доверительными границами $\Theta_j(P_j)$, то доверительную границу НСП результата измерения вычисляют по формуле (9.2) /5/

$$\Theta_j(P) = K(P) \sqrt{\sum_{j=1}^{m=1} \frac{\Theta_j^2(P_j)}{K_j^2}}, \quad (9.2)$$

где $K(P)$ и K_j - те же, что и в предыдущем случае, коэффициенты, соответствующие доверительной вероятности P и P_j соответственно;

m_j - число составляющих НСП.

Этими действиями анализируются применяемые СИ.

Далее приступают к обработке случайной погрешности по результатам наблюдений.

Обработку результатов в этом случае рекомендуется начать с проверки на отсутствие промахов (грубых погрешностей). Промах - это результат X_n отдельного наблюдения, входящего в ряд из n наблюдений, который для данных условий измерений резко отличается от остальных результатов этого ряда. Если оператор в ходе измерения обнаруживает такой результат и достоверно находит его причину, он вправе его отбросить и провести (при необходимости) дополнительное наблюдение взамен отброшенного.

При обработке уже имеющихся результатов наблюдений произвольно отбрасывать отдельные результаты нельзя, так как это может привести к фиктивному повышению точности результата измерения. Поэтому применяют следующую процедуру. - вычисляют среднее арифметическое $\bar{X}$ результатов наблюдений X_i по формуле (9.3) /5/

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}, \quad (9.3)$$

Затем по формуле (9.4) вычисляют оценку СКО результата наблюдения /5/

$$S(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}, \quad (9.4)$$

По формуле (9.5) находят отклонение v_n предполагаемого промаха X_n от $\bar{X}$ /5/

$$v_n = |X_n - \bar{X}|, \quad (9.5)$$

По числу всех наблюдений n (включая X_n) и принятому для измерения значению P (обычно 0,95) по таблице 9.2 - находят $Z_{(P,n)} = 1,96$ - значение Лапласа - нормированное выборочное отклонение нормального распределения. Если $v_n < Z_{(P,n)} \cdot S(X)$, то наблюдение X_n не является промахом; если $v_n \geq Z_{(P,n)} \cdot S(X)$, то X_n - промах, подлежащий исключению. После исключения X_n повторяют процедуру определения $\bar{X}$ и $S(X)$ для оставшегося ряда результатов отклонений от нового значения $\bar{X}$ (вычисленного исходя из $(n - 1)$). Почему $(n - 1)$, а не n мы рассматривать не будем, т.к. это вопрос теоретической

метрологии. За результат измерения принимают среднее арифметическое $\bar{X}$ результатов наблюдений X_n . Погрешность X_i содержит случайную и систематическую составляющие. Случайную составляющую, характеризующую СКО результата измерения, оценивают по формуле (9.6) /5/

$$S(X) = \frac{S(X_i)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)} \right)}, \quad (9.6)$$

В предположении принадлежности результатов наблюдений X_i к нормальному распределению, находят доверительные границы случайной погрешности результата измерения при доверительной вероятности P по формуле (9.7) /5/

$$\varepsilon(P) = t(P, n) \cdot S(X), \quad (9.7)$$

где t - коэффициент Стьюдента.

Таблица 9.2 - Значения t при P равной

n	$P=0,70$	$P=0,90$	$P=0,95$	$P=0,997$
2	1,963	6,314	12,706	212,2
3	1,386	2,920	4,303	18,216
4	1,250	2,353	3,182	8,891
5	1,190	2,132	2,776	6,435
6	1,156	2,015	2,571	5,376
7	1,134	1,943	2,447	4,800
8	1,119	1,895	2,365	4,442
9	1,108	1,860	2,306	4,199
10	1,100	1,833	2,262	4,024
15	1,076	1,761	2,145	3,583

Доверительные границы (P) НСП результата измерения с многократными наблюдениями определяют точно так же, как и при измерении с однократным наблюдением - по формулам (9.2) или (9.3).

Суммирование систематической и случайной составляющих погрешности результата измерения при вычислении (P) рекомендуется осуществлять с использованием критериев и формул (9.9), (9.10) и (9.11), в которых при этом $S(X)$ заменяется на

$$S(X) = \frac{S(X)}{\sqrt{n}}$$

СКО результата измерения с однократным и многократным наблюдением вычисляют одним из следующих способов:

1. Если в технической документации на СИ или в МВИ, указаны нормально распределенные составляющие случайной погрешности результата наблюдения (инструментальная, методическая, из-за влияющих факторов, оператора и т.д.), то СКО вычисляют по формуле (9.9) /5/

$$S(X) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m=2} S_j^2(X)}, \quad (9.9)$$

где $m=2$ - число составляющих случайной погрешности;

S_j - значения СКО этих составляющих.

Доверительную границу случайной погрешности результата измерения $\varepsilon(P)$ в этом случае вычисляют по формуле (9.10) /5/

$$\varepsilon(P) = Z_{p/2} \cdot S(X), \quad (9.10)$$

где $Z_{p/2}$ - значение нормированной функции Лапласа в точке $p/2$ при доверительной вероятности P приведены в таблице 9.3.

Таблица 9.3. - Значения функции Лапласа от P

P	$Z_{p/2}$
0,90	1,65
0,95	1,96
0,96	2,06
0,97	2,17
0,98	2,33
0,99	2,58

2. Если в тех же документах случайные составляющие погрешности результата наблюдения представлены доверительными границами $\varepsilon_j(P)$ при одной и той же доверительной вероятности P , то доверительную границу случайной погрешности результата измерения при доверительной вероятности P вычисляют по формуле (9.11) /5/

$$\varepsilon(P) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m=2} \varepsilon_j^2(P)}, \quad (9.11)$$

3. Если случайные составляющие погрешности результата наблюдения определяют предварительно в реальных рабочих условиях экспериментальными методами при числе наблюдений $n_j < 30$, то доверительную вероятность P вычисляют по формуле 9.12 /5/

$$\varepsilon(P) = t \sqrt{\sum_{j=1}^{m=2} S_j^2(X)} , \quad (9.12)$$

где t - коэффициент Стьюдента, соответствующий наименьшему числу наблюдений n min из всех n ;

$S_j(X)$ -оценки СКО случайных составляющих погрешности результата наблюдения, определяемых по формуле (9.13), на отсутствие промахов.

Если в эксперименте невозможно или нецелесообразно определить СКО составляющих случайной погрешности и определенно сразу суммарное СКО, то в формуле (9.7) доверительной границы 3-го случая $m = 2 = 1$.

4. Если случайные составляющие погрешности результата наблюдений представлены доверительными границами (P), соответствующими разным P , то сначала определяют СКО результата измерения по формуле (9.13) /5/.

$$S(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m=2} \frac{\varepsilon_i^2(P_i)}{Z_{P_i/2}^2}} , \quad (9.13)$$

Затем вычисляют $\varepsilon(P)$ по той же формуле (9.5) первого случая, где $Z_{p/2}$ - значения функции Лапласа.

$S(X)$ - С К О отдельных наблюдений.

На основании нижеследующей оценки делается вывод о количестве наблюдений - однократные или многократные измерения.

Для суммирования систематической и случайной составляющей погрешностей рекомендуется следующий способ /5/.

Если

$$\frac{\Theta(P)}{S(X)} < 0,8 ,$$

то НСП $\Theta(P)$ пренебрегают и окончательно принимают $\varepsilon(P)$ за погрешность результата измерения $\Delta(P)$ при доверительной вероятности P .

Если $\Theta_i(P) / S(X) > 8$, то измерения являются, как правило, однократными ($\Theta_i(P)$ - граница НСП результата измерений).

Если

$$\frac{\Theta(P)}{S(X)} > 8 ,$$

то пренебрегают случайной погрешностью СКО – $S(X)$ и принимают

$\Delta(P) = \Theta(P)$.
Если

$$0,8 \leq \frac{\Theta(P)}{S(X)} \leq 8,$$

то доверительную границу погрешности результата измерений вычисляют по следующей комплексной формуле (9.14) /5/

$$\Delta = K_p \cdot [\Theta(P) + \varepsilon(P)], \quad (9.14)$$

где

$$K_p = K_{\Sigma(\gamma)} = \frac{\sqrt{1 + \gamma^2}}{(1 + \gamma)};$$

$$\gamma = \frac{\Theta(P)}{\sqrt{3} \cdot K(P) \cdot S(X)}.$$

В квадратных скобках $K(P)$, при определении величины « γ » принимается по таблице 9.4 от формулы (9.2).

По вычисленному значению в приведенной таблице находят значения

Если вычисленные по формуле и таблице значения $K_{\Sigma(\gamma)}$, не совпадают, то проводят эстрополяцию между этими значениями.

Таблица 9.4 - Значения $K_{\Sigma(\gamma)}$ от показателя γ

γ	0	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	∞
$K_{\Sigma(\gamma)}$	1,00	0,8	0,75	0,7	0,71	0,7	0,75	0,79	0,8	0,85	1,00

При увеличении числа наблюдений - n , СКО - (среднеквадратичное отклонение) случайной погрешности результата измерений $S(X)$ уменьшается по закону обратной пропорциональности - $\sqrt{n}$.

Этим руководствуются при выборе n для разумного уменьшения $S(X)$, например, по сравнению с НСП результата измерений Θ , не зависящей от n (до выполнения условия $\Theta_i / S(X) \geq 8$, дальнейшее увеличение n не имеет смысла). Как правило, выбор числа наблюдений производится при разработке МВИ.

Для обеспечения качества производства в цехах предприятия должна быть правильно оформленная технология измерений. С июня 1997 года в Российской Федерации действует ГОСТ Р 8.563-96 «ГСИ. Методики выполнения измерений». Согласно этого стандарта, каждый параметр или размер должен быть оформлен по требованиям вышеуказанного стандарта под названием «Методика выполнения измерений» как новый стандарт и аттестован органами, аккредитованными институтами Госстандарта Российской Федерации. В сфере производства различных предприятий содержится большое количество параметров, подлежащих измерениям и контролю, и если все измерения оформлять методиками выполнения измерений строго по вышеуказанному стандарту, то их количество будет загромождать перечислением их в технологическом процессе отдельными списками. На все ли параметры необходимо иметь документированную методику выполнения измерений строго по требованиям ГОСТ Р 8.563 – 96?

9.2 Прямые измерения с однократными наблюдениями

За результат измерения в этом случае принимают результат однократного наблюдения X (с введением поправки, если она имеется), используя предварительно полученные (например, при разработке МВИ) данные об источниках, составляющих погрешность.

подавляющее большинство измерений - однократные. Вообще, в бытовой практике людей, в производственной практике выполняются однократные измерения (токарная обработка, фрезерная обработка, кузнечно-штамповое производство, сборка машин, слесарно-лекальная обработка деталей и т.д. исключая тонкую настройку или прецизионные сопряжения деталей). Иногда, в отдельных случаях, применяют два или три метода измерений, взаимоисключающих погрешности. В обычных условиях точность однократных измерений вполне приемлема, а простота, высокая производительность - (количество измерений в единицу времени и сравнительно низкая стоимость по оценке трудозатрат) ставят их вне конкуренции. Если, человек задался вопросом о том, что такое однократные и многократные измерения, то возникает другой вопрос: - почему в теории и практике измерений столько сложностей, формул, чуть ли не «миф» такой научности и невозможности избавиться от какой-то там погрешности? В жизни нашей, в быту, в магазине, на работе, мы редко имеем прямое ощущение погрешности при измерениях и постепенно привыкаем к тому, что этих погрешностей нет в природе, а метрологи их просто придумывают, чтобы оправдать свою занятость! На самом-то деле погрешность существует всегда, но мы ее или не учитываем, или ее величина настолько незначительная, что ею можно пренебречь, но, в любом случае, при измерениях мы обязаны ее оценить, хотя бы на примерном уровне, а затем количественно. Пренебрежение этой погрешностью в жизни людей часто мстительно «аукается» тем кто ей пренебрегает. Хотя, имея такой опыт, мы опять и опять «наступаем на эти грабли» и до конца своей жизни не понимаем или не сталкиваемся с

обстоятельствами, требующими более точного подхода к измерениям, и применяем только однократные измерения. Не ошибается, или ошибается, но значительно реже, лишь тот, кто относится к любым измерениям, как к случайному событию измерительного наблюдения и не считает результат наблюдения за окончательный результат измерения. Проводит еще два наблюдения и, после элементарного анализа и осмысления на априорность полученной информации, по величине наблюдения и погрешности, делает окончательный расчет результата измерения, хотя бы на глаз, на вскидку. Итак, необходимым условием проведения однократного измерения служит наличие априорной информации о количестве физических величин, какого - либо параметра. Что значит «априорная»?! Это значит - примерная, на глаз вам уже известная информация. Например: Длина стола; Величина напряжения переменного тока; Величина температуры горящего пламени в топке котла, и т.д. Вам с достаточно высокой точностью уже известно или видно, из опыта предыдущих измерений, с какой вероятностью (вид закона распределения случайных событий) результаты наблюдений дают ожидаемый результат измерения, после простейших операций расчетной оценки. Кроме этой информации, при сомнении, Вы можете дополнительно использовать информацию о том, насколько результат наблюдения отличается от нормируемого результата (параметра, размера) по НТД, о классе точности средства измерения, которым Вы воспользовались, и величине поля допуска (качества) нормируемого размера. В связи с этим Вам необходимо, под «флагом» метрологической экспертизы, провести анализ соответствия цены деления СИ, его класса точности с величиной поля допуска и их соотносительности по сравнительным величинам. Поле допуска может быть симметричным - плюс, минус «А» или плюс А1, минус А2. В зависимости от класса точности и чувствительности СИ Вы будете иметь величину цены деления – «В». Соотношение - плюс, минус А или (А1 - А2) к «В» должно быть много больше единицы (лучше всего 5 и выше), т.е. величина цены деления СИ должна укладываться в поле допуска как минимум один раз или больше. Из этого Вам нужно учесть величины поправок - аддитивных и мультипликативных (от латинских слов *additivus* - прибавляемый, *multiplico* - умноженный). Эти поправки, как правило неизвестны, но если проводятся 3 наблюдения при измерениях и есть их различия по величине – $X_{\max}$ и $X_{\min}$, то в Вашем случае поправки существуют и следует оценить норму однократности измерений. К такой норме относится известная зависимость

$$\frac{\Theta(P)}{S(X)} < 0,8; \quad \frac{\Theta(P)}{S(X)} > 8; \quad 0,8 \leq \frac{\Theta(P)}{S(X)} \leq 8;$$

$$\text{где } \Theta(P) = K(P) \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{m1} \Theta_i^2}; \quad S(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m2} S_i^2(X)};$$

или формула (9.13)

где $K(P)$ – коэффициент, определяемый принятой $P(x)$ и числом m ;

Θ_j – найденные нестатистическим методами границы j -й составляющей НСП (неисключенным остатком систематических погрешностей), представляющей границы интервала, внутри которой находится эта составляющая, определяемые при отсутствии сведений о вероятности ее нахождения в этом интервале. Значения $K(P)$ берется по таблице 9.2;

$S(x)$ - СКО, среднеквадратическое отклонение случайных величин.

Допустим, у Вас получены 3 наблюдения измерений - $X_{\max}$, X_i , $X_{\min}$. Граница доверительной вероятности размаха результатов наблюдений $X_{\max} - X_{\min}$. Необходимо сравнить величину этой границы с величиной поля допуска в НТД, сколько раз вмещается эта граница в величину поля допуска? Если вмещается как минимум один раз с вероятностью 0,99 или 1,0, то априорная информация обеспечивается на 100 % и однократность измерения обеспечивается. Если этого оценить сразу нельзя, то делается расчет вышеуказанной зависимости.

$$\Theta(P) = 1,3 \cdot \sqrt{(\Delta_{СИ})^2 + (\Delta_{мет.})^2 + (\Delta_{пред.этало́на})^2},$$

при $N \geq 4$ составляющих НСП получаем НСП - неисключенный остаток систематической погрешности, от которой нельзя избавиться.

$S(X)$ -среднеарифметическое от наблюдений = $\sum(X_{\max} + X_i + X_{\min})/3$;

$$S(X) = \sqrt{\frac{(X_{\max} - \bar{X})^2 + (X_i - \bar{X})^2 + (X_{\min} - \bar{X})^2}{n-1}},$$

получаем $СКО = S(x)$.

Делим Θ_i на $S(x)$, если результат больше или равен 8, то однократные измерения имеют право на осуществление и тогда суммарная погрешность намного меньше цены деления СИ и поля допуска, пренебрегают случайной погрешностью СКО и принимают $\Delta(P) = \Theta_i(P)$. В этих случаях Методика Выполнения Измерений по ГОСТ Р 8.563 - 96 может быть совмещена с инструкцией на эксплуатацию СИ и норму, заложенную в НТД - (КД, ТД и технологическую инструкцию).

Если $\Theta_i(P)/S(x) < 0,8$, то величиной $\Theta_i(P)$ - НСП пренебрегают и окончательно принимают за погрешность результата измерения

$$\Delta(P) = Z_{P/2} \cdot S(X) = \varepsilon(P)$$

при доверительной вероятности (P) .

где $Z_{1,2}$ - коэффициент Лапласа по спец. таблицам от вероятности (P) .

Если $0,8 < \Theta_i(P)/S(x) < 8$, то доверительную границу погрешности результата измерений вычисляют по формуле (9.12). В таких случаях необходимо провести с результатами наблюдений при измерениях строгий статистический перерасчет погрешности, границы доверительной вероятности и т.д. с обязательными процедурами по Методике Выполнения Измерений (МВИ) по ГОСТ Р 8.563 - 96 и ее документированием. Процедуры перерасчета имеют большой объем и в краткой форме здесь приведены быть не могут. Желаящим необходимо обратиться к специальной метрологической литературе. За результат измерения в любом случае принимается выражение: $\langle A_i - \varepsilon(P) \rangle$ меньше или равно «А» меньше или равно $\langle A_i + \varepsilon(P) \rangle$; где: $\varepsilon(P)$ погрешность в зависимости от того, какими величинами можно пренебречь, а какие подлежат обязательному учету.

Из методического материала в помощь метрологам - Москва, ТОО «ТОТ» 1996 год. по МВИ ГОСТ Р 8.563 - 96 - стр. 6-7 следует: «Наиболее часто, на практике в качестве исходных данных для установления требований к точности измерений при контроле используют допуск на контролируемый параметр (Квалитет). Считается удовлетворительным соотношение между пределом погрешности измерений и границей симметричного поля допуска - 1:5, в ряде случаев - 1:4. При соотношении - 1:3 вводится контрольный (суженый) допуск на контролируемый параметр. Иногда требования точности измерений устанавливают в виде пределов допускаемых значений характеристик абсолютной или относительной погрешности измерений. Форма приведенной погрешности измерений не используется - (это одна из форм выражения погрешности средств измерений - СИ, которая достаточно всем известна.) Наиболее распространенным способом выражения требований к точности измерений является граница допускаемого интервала наблюдений при измерениях, в котором с заданной вероятностью «Р» должна находиться погрешность измерения, т.е. вышеуказанная зависимость соотношений НСП и СКО. Такое соотношение часто иллюстрируется формулой коэффициента точности – $K_T = 1/2 T_{cl}/\Delta_{си} = 5:1; 4:1; 3:1$ (суженый). Если границы симметричны, то перед их одним числовым значением ставят знак $\pm\varepsilon(P)$ - поправка к среднеарифметическому значению наблюдений при измерениях и это будет являться результатом измерений. Если «Р=1», то требований к точности измерений используются именно эти пределы допускаемых значений погрешностей измерений – « $\varepsilon(P)=\Delta$ », при этом вероятность «Р=1» не указывается». На основании этой выдержки из ГОСТ Р 8.563 - 96 - стр.4, не все МВИ необходимо регламентировать документально самостоятельно, разрабатывать текст МВИ - ее содержание и аттестацию строго по ГОСТ Р 8.563 - 96 не обязательно, особенно для измерений давления, с помощью показывающих манометров, электрических величин щитовыми приборами, линейно-угловых и многих других величин, подпадающих под вышеприведенные зависимости, с помощью простых средств измерений - СИ. В этих случаях МВИ не нужно оформлять отдельным документом по ГОСТ Р 8.563 - 96, а достаточно указаний в КД, ТД, Проектной документации

на крупный объект технологического оборудования без сложных измерительных зависимостей, инструкций по использованию СИ или ТУ на СИ, оформленные соответствующим стандартом, зарегистрированных в Госреестре типа СИ. Однако, там где требуется определять сложные функциональные зависимости при испытаниях продукции или его изготовлении - (аэродинамические, тепловые испытания машин, расхода газожидкостных материалов и т.п.), то МВИ необходимо оформлять по ГОСТ Р 8.563 - 96, в ТУ на сложную продукцию также необходимо включать МВИ с указанием их регистрационных номеров, после их аттестации в порядке установленным ГОСТ Р 8.563 - 96. Необходимо иметь в виду тем, кто не знает о том, что Госстандарт РФ силами своих институтов ведет работу по разработке МВИ распространенного типа, что эти МВИ появляются в печати под следующим видом: - После цифры 563 в таких МВИ стоит точка и новая цифра - порядковый номер такой МВИ, например - ГОСТ Р 8.563.3 - 97 «ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Процедура и модуль расчетов. Программное обеспечение». Таким образом, понимание однократных наблюдений при измерениях к оператору (человеку) приходит только после тщательного осознания технологии многократных наблюдений при измерениях, хотя в РМГ 29 -99 записано, что однократные измерения это такие измерения, которые выполняются один раз!

9.3 Косвенные измерения

Значение измеряемой величины A находят по результатам измерений аргументов. $A_1, \dots, a_i, \dots, a_m, \dots$, связанных с искомой величиной уравнением (9.15) /5/

$$A = f(a_1, \dots, a_i, \dots, a_m) \quad (9.15)$$

Вид функции f определяется при установлении модели объекта измерения ОИ.

9.3.1 Косвенные измерения при линейной зависимости

Искомая величина A связана с m измеряемыми аргументами уравнением (9.16) /5/

$$A = \sum_{i=1}^m b_i \cdot a_i, \quad (9.16)$$

где b_i - постоянные коэффициенты.

Предполагается, что корреляция между погрешностями измерений a_i отсутствует.

Результат измерения $\bar{A}$ вычисляют по формуле (9.17) /5/

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^m b_i \cdot \bar{a}_i, \quad (9.17)$$

где $\bar{a}_i$ - результат измерения a_i с введенными поправками.

Оценку СКО результата измерения $S(\bar{A})$ вычисляют по формуле (9.18)

/5/

$$S(\bar{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \cdot S^2(\bar{a}_i)}, \quad (9.18)$$

где $S^2(\bar{a}_i)$ - оценка СКО результата измерений $\bar{a}_i$.

Доверительные границы $\varepsilon(P)$ случайной погрешности $\bar{A}$ при нормальном распределении погрешностей $\bar{a}_i$ вычисляют по формуле (9.19) /5/

$$\varepsilon(P) = t(P, n_{эф}) \cdot S(\bar{A}), \quad (9.19)$$

где $t(P, n_{эф})$ - коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности P (обычно 0,95, в исключительных случаях 0,99) и эффективному числу наблюдений; $n_{эф}$ - вычисляемому по формуле (9.20)

$$n_{эф} = \frac{\left[\sum_{i=1}^m b_i^2 \cdot S^2(\bar{a}_i) \right]^2 - 2 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{b_i^4 \cdot S^4(\bar{a}_i)}{n_i + 1}}{\sum_{i=1}^m \frac{b_i^4 \cdot S^4(\bar{a}_i)}{n_i + 1}}, \quad (9.20)$$

где n_i - число наблюдений при измерении a_i .

Доверительные границы $\Theta(P)$ НСП результата такого измерения, сумму $\Theta(P)$ и $\varepsilon(P)$ для получения окончательного значения $\Delta(P)$ рекомендуется вычислять с использованием критериев и формул (2,3,9 - 11), в которых m, Θ_i и $S(x)$ заменяются, соответственно, на m, b_i, Θ_i и $S(\bar{A})$.

9.3.2 Косвенные измерения при нелинейной зависимости

При некоррелированных погрешностях измерений a_i используется метод линеаризации путем разложения функции $f(a_1, \dots, a_m)$ в ряд Тейлора по формуле (9.21) /5/

$$f(a_1, \dots, a_m) = f(\bar{a}_1, \dots, \bar{a}_m) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial f}{\partial a_i} \Delta a_i + R, \quad (9.21)$$

где $\Delta a_i = a_i - \bar{a}_i$ - отклонение отдельного результата наблюдения a_i от $\bar{a}_i$;

R - остаточный член.

Метод линеаризации допустим, если приращение функции f можно заменить ее полным дифференциалом. Остаточным членом $R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 f}{\partial a_i^2} (\Delta a_i)^2$,

пренебрегают, если $R < 0,8 \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial a_i} \right)^2 \cdot S^2(\bar{a})}$

где $S(a_i)$ - оценка СКО случайных погрешностей результата измерения a_i .

При этом отклонения Δa_i должны быть взяты из возможных значений погрешностей и такими, чтобы они максимизировали R .

Результат измерения $\bar{A}$ вычисляют по формуле (9.22) /5/

$$A = f(\bar{a}_1, \dots, \bar{a}_i), \quad (9.22)$$

Оценку СКО случайной составляющей погрешности результата такого косвенного измерения $S(A)$ вычисляют по формуле (9.23) /5/

$$S(\bar{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial a_i} \right)^2 \cdot S^2(\bar{a}_i)}, \quad (9.23)$$

а $\varepsilon(P)$ - по формуле (9.19).

Значение $n_{\text{эф}}$, границы НСП $\Theta(P)$ и погрешность $\Delta(P)$ результата косвенного измерения при нелинейной зависимости вычисляют так же, как и при линейной зависимости, но с заменой коэффициентов b на $\partial f / \partial a_i$.

Метод приведения (для косвенных измерений с нелинейной зависимостью) применяется при неизвестных распределениях погрешностей измерений a_i и при корреляции между погрешностями a_i для получения результата косвенного измерения и определения его погрешности. При этом предполагается наличие ряда n результатов наблюдений a_{ij} измеряемых аргументов a_i . Сочетания a_{ij} , полученных в j -м эксперименте подставляют в формулу (9.14) и вычисляют ряд значений A_i измеряемой величины A . Результат измерения A вычисляют по формуле (9.24) /5/

$$\bar{A} = \sum_{j=1}^n \frac{A_j}{n}, \quad (9.24)$$

Оценку СКО $S(A)$ - случайной составляющей погрешности A вычисляют по формуле (9.25) /5/

$$S(\bar{A}) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{(A_j - \bar{A})^2}{[n(n-1)]}}, \quad (9.25)$$

$\varepsilon(P)$ вычисляют по формуле (9.14).

Границы НСП $\Theta(P)$ и погрешность $\Delta(P)$ результата измерения A определяют описанными выше способами для нелинейной зависимости.

9.4 Формы представления и интерпретация результатов измерений

Результат измерения должен содержать не только полученное значение измеряемой величины, но и, обязательно, характеристики его погрешности с указанием числа наблюдений и доверительной вероятности. Вместо характеристик погрешности измерений можно дать ссылку на стандартизованную МВИ, по которой выполнялись измерения.

Допускается представление результата измерений доверительным интервалом, покрывающим истинное значение измеряемой величины с определенной доверительной вероятностью. В этом случае характеристики погрешности отдельно не указываются. Совместно с результатами измерений могут приводиться дополнительные данные и условия измерений, которые необходимы для практического их использования, например, моменты времени, к которым относятся результаты измерений, сведения о принятой модели ОИ. Недопустима интерпретация результатов и погрешностей измерений за рамками (фреймом) принятой модели объекта измерений. Наименьшие разряды значений результатов измерений должны быть такими же, как наименьшие разряды значений СКО абсолютной погрешности измерений или значений границ, в которых находится абсолютная погрешность измерений или ее статистические характеристики. Характеристики погрешности выражаются числом, содержащим не более двух значащих цифр, так как погрешность определения погрешности, в лучшем случае, превышает 10 %. Наиболее распространены следующие формы представления результатов измерений. При симметричной погрешности результат измерения представляют в форме $\bar{A} \pm \Delta$; P или $\bar{A} \pm \Delta$; P . При несимметричной погрешности измерений – в форме $\bar{A}$; $\Delta(P)$ от Δ_n до Δ_v ; P , где Δ_n и Δ_v - значения нижней и верхней границы погрешности измерения.

9.5 Правила округления и записи результатов наблюдений и измерений

9.5.1 Числовое значение результата наблюдения округляют в соответствии с числовым разрядом значащей цифры погрешности измерений. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, в десятичных дробях - отбрасываются. Если десятичная дробь оканчивается нулями, они отбрасываются только до того разряда, который соответствует разряду погрешности. Пример: результат 1,072000, погрешность $+ 0,0001$. Результат округляют до 1,0720. Если первая (слева направо) из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр меньше 5, остающиеся цифры не изменяются. Если первая из этих цифр равна 5, а за ней не следует никаких цифр, или идут нули, то, если последняя цифра в округляемом числе четная или нуль, она остается без изменения, если нечетная - увеличивается на единицу. Пример: 1234,50 округляют до 1234; 8765,50 - до 8766. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр больше 5 или равна 5, но за ней следует значащая цифра, то последняя остающаяся цифра увеличивается на единицу. Пример: 6783,6 округляют до 6784; 12,34501 до 12,35. В соответствии с правилом 1, добавляют один разряд справа, т.е. в первом примере результат 1,072000 нужно округлять не до 1,0720, а до 1,07200.

9.5.2 Если в процессе вычисления встречается операция деления, бессмысленно продолжать ее по правилам арифметики, после того, как получен результат, соответствующий правилу 1.

9.5.3 При определении предстоит произвести некоторые математические операции, то при округлении результатов числа знаков при вычислении погрешностей измерений следует учитывать, что погрешность определения значения погрешности достаточно велика, порядка 30 % при $n = 10$ и порядка 15 % при $n = 20 - 25$, поэтому, при $n < 10$ следует оставлять одну значащую цифру, если она больше 3-х и две, если первая из них меньше 4-х. Погрешность, возникающая в результате вычислений, не должна превышать 10 % суммарной погрешности измерений. Поэтому, если над результатами измерений (наблюдений). Пример, если при $n = 10$, $s = 0,523$ оставляем значение $s = 0,5$; если при $n = 10$, $s = 0,253$ оставляем значение $s = 0,25$. При $n > 10$, достаточно надежно оставлять во всех случаях две значащие цифры. Значения $Z(P, n)$ представлены в таблице 9.5.

Таблица 9.5 - Значения $Z(P, n)$ при P равной

n	0,90	0,95	0,99
3	1,412	1,414	1,414
4	1,689	1,710	1,728
5	1,869	1,917	1,972
6	1,996	2,067	2,161
7	2,093	2,182	2,310
8	2,172	2,273	2,431
9	2,237	2,349	2,532
10	2,294	2,414	2,616
12	2,387	2,519	2,753
14	2,461	2,602	2,855
16	2,523	2,670	2,946

10 Средства измерений и их классификация по ГСИ

Классификация СИ по определяющим признакам.

В метрологии СИ принято классифицировать по виду, принципу действия и метрологическому назначению.

Различают следующие виды СИ:

- меры;
- измерительные устройства;
- измерительные установки;
- измерительные системы.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Измерительное устройство – применяется самостоятельно или в составе измерительных установок и измерительных систем. В зависимости от формы представления сигнала измерительной информации измерительные устройства подразделяются на измерительные приборы и измерительные преобразователи.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия оператора.

Измерительный преобразователь – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но непосредственно не воспринимается оператором.

Измерительный прибор и измерительный преобразователь в блок– схеме соответственно подразделяются на четыре подтипа: два первых из них одинаковы, а два других имеют между собой различия.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных СИ (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенных в одном месте. Обобщенная структурная схема СИ представлена на рисунке 10.1.

Для удобства анализа различных соединений СИ в Измерительные устройства или Информационно-Измерительные Системы между собой и со средствами автоматического управления любое устройство измерения принято рассматривать как некоторый преобразователь, служащий для преобразования входного сигнала X в выходной сигнал Y . Такое представление Измерительных Устройств позволяет применять при анализе систем хорошо разработанный аппарат теории автоматического регулирования. Если входной и выходной сигналы представляют собой некоторые физические процессы, характеризующиеся несколькими параметрами, то среди них различают информативные и неинформативные. Для конструкторов СИ и приборостроителей чрезвычайно важной является информация о внутренней структуре измерительного устройства. А они состоят из некоторого числа

элементов (составных частей), предназначенных для выполнения определенных функций, таких, как:

- преобразование поступающего сигнала по форме или виду энергии;
- успокоение колебаний, защита от помехонесущих полей;
- коммутация электрических цепей, представление информации (цифровая, диаграммная по кругу или в ленту, только показывающая результат без регистрации и т.д.).

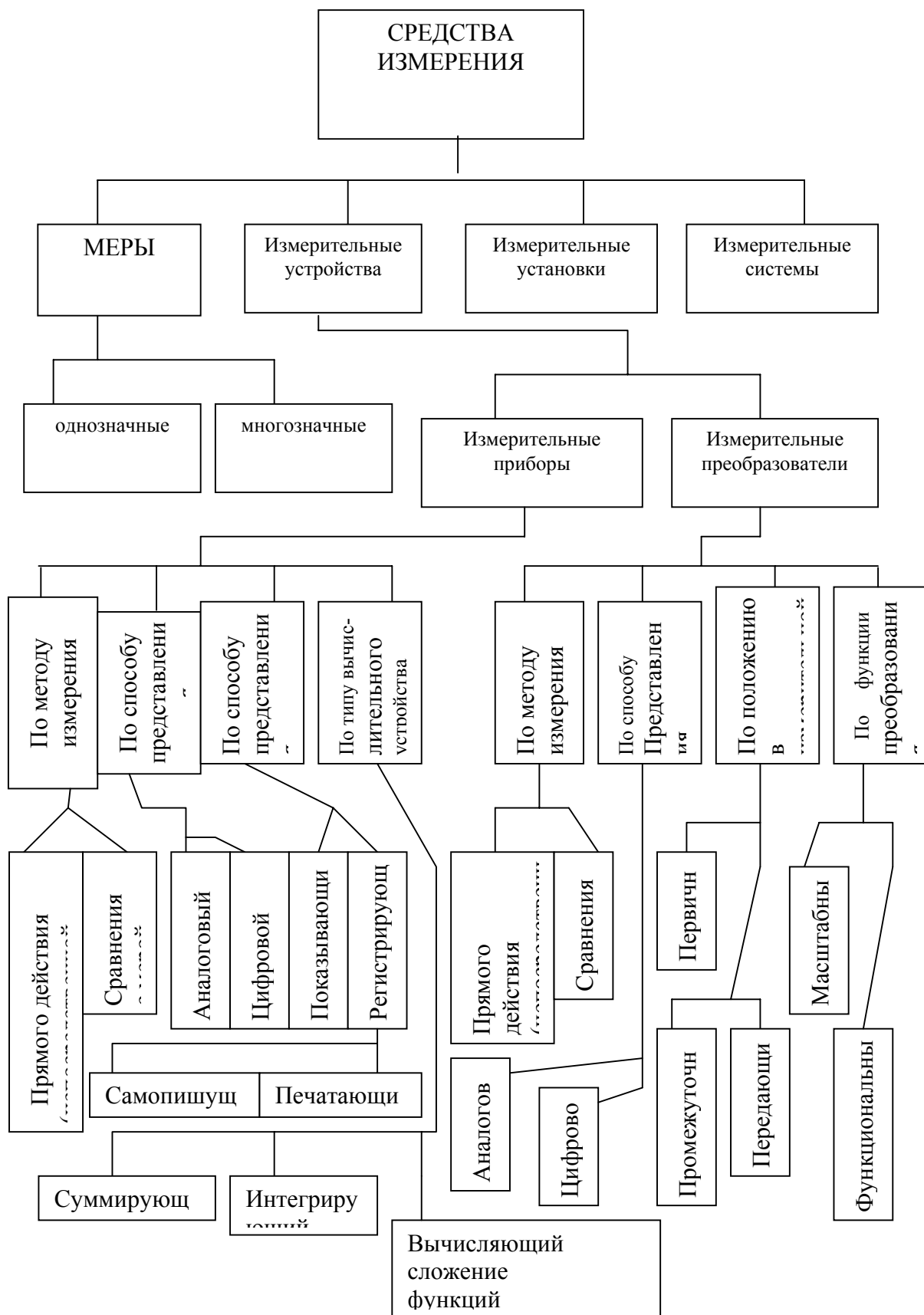


Рисунок 10.1 – Обобщенная структурная схема СИ

К элементам измерительных устройств относятся опоры, направляющие пружины, магниты, контактные, множительно-передаточные механизмы и т. д.

Основные элементы структурных схем СИ: меры, компараторы, первичные и вторичные преобразователи, устройства обработки информации, устройства представления и регистрации информации, каналы связи, вспомогательные элементы СИ.

Преобразовательный элемент - элемент СИ, в котором происходит одно из ряда последовательных преобразований измерительных величин.

Измерительная цепь - совокупность преобразовательных элементов СИ, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации. Чувствительный элемент - первый в измерительной цепи преобразовательный элемент, находящийся под непосредственным воздействием измеряемой величины.

Измерительный механизм - часть конструкции СИ, состоящая из элементов, взаимодействие которых вызывает их взаимное перемещение.

Отсчетное устройство - часть конструкции СИ, предназначенная для отсчитывания значений измеряемой величины.

Структурная схема измерительного устройства прямого действия представлена на рисунке 10.2

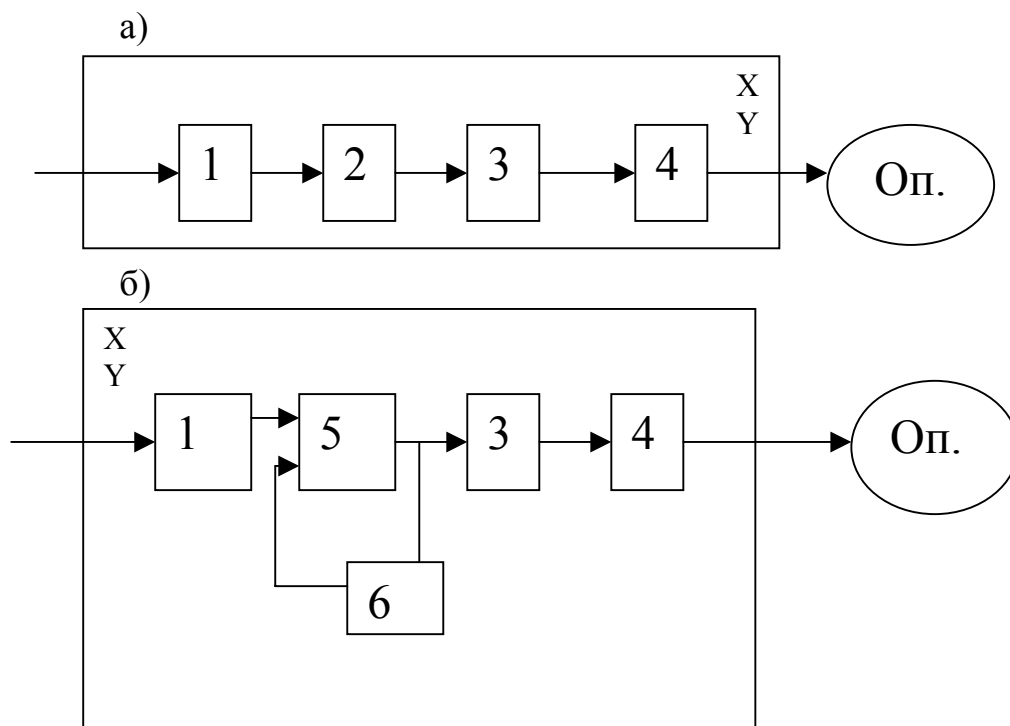


Рисунок 10.2 - Структурная схема измерительного устройства действием сравнения

Ниже будут приведены структурные схемы измерительных устройств прямого и уравновешивающего действия, но без измерительного механизма и отсчетного устройства, а только сигнального порядка для восприятия

электронных средств контроля и управления УВК - управляющим вычислительным комплексом. Однако на выходе в конечном преобразовательном элементе, формирующем выходной сигнал (усиление по мощности, преобразование по частоте колебаний и т.д.) таким образом, что его можно регистрировать, передавать на расстояние, хранить и обрабатывать в статистическую информацию.

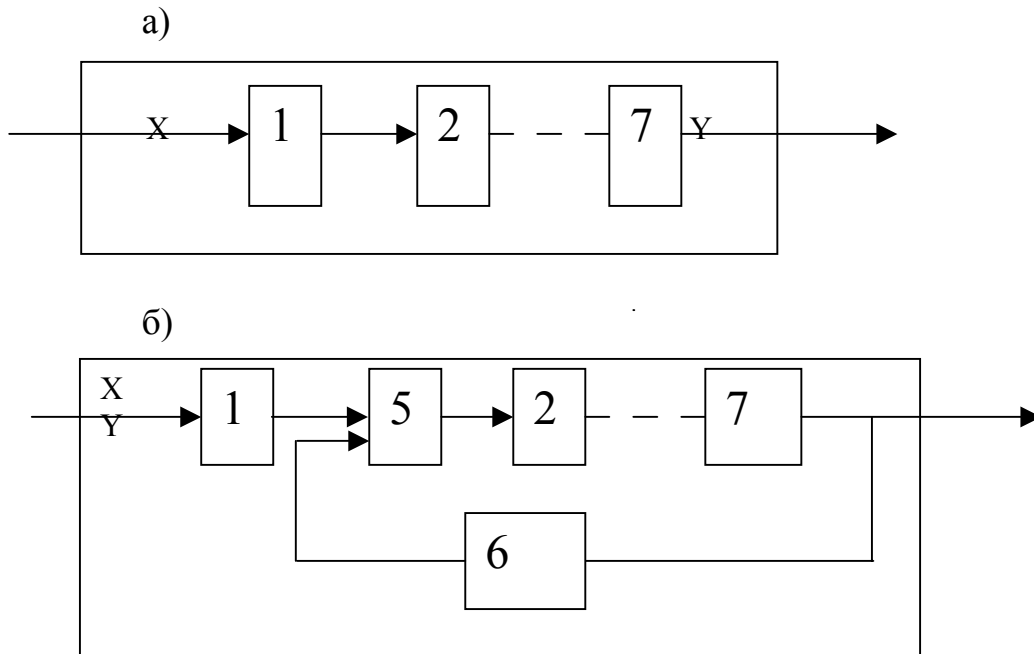


Рисунок 10.3 – Структурная схема измерительного устройства прямого и уравнивающего действий без измерительного механизма

Следующим элементом, который необходимо подробнее раскрыть, является отсчетное и регистрирующее устройство, где основным узлом является узел показания результата. **Показанием** называют значение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в единицах этой величины или отградуированное в шкале этих величин. Отсчетное устройство представляет собой цифровое табло или, в подавляющем большинстве случаев, **шкалу** с указателем.

Для шкальных, отсчетных устройств принято использовать ряд понятий, сущность большинства из которых легко установить по рисунку 10.4.

Статические характеристики и параметры измерительных устройств.

В общем случае, когда при измерениях все условия измерения, а также входные и выходные сигналы и наблюдения не изменяются как функция от времени, остаются параметрами постоянными, то такие измерения называют статическими (стационарными или равновесными).

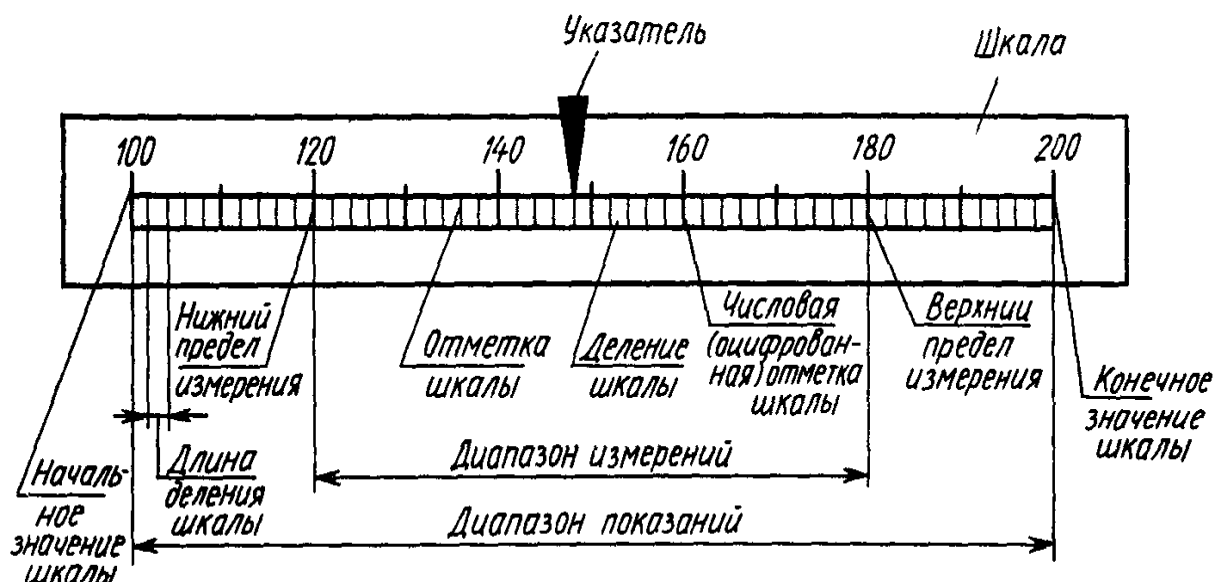


Рисунок 10.4 - Схема отсчетного устройства измерительного прибора

Статической характеристикой измерительного устройства называют функциональную зависимость выходного сигнала от входного в статическом режиме работы этого устройства.

Статическая характеристика описывается как некоторое нелинейное уравнение (10.1) (уравнение преобразования) /8/

$$Y=f(X), \quad (10.1)$$

Для измерительных преобразователей, а также измерительных приборов с неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц измеряемой величины, то статическую характеристику принято называть **функцией** преобразования. Для измерительных приборов иногда статическую характеристику называют **характеристикой шкалы**. Определение статической характеристики связано с выполнением градуировки, поэтому для всех средств измерений используют понятие **градуировочной характеристики**, под которым понимают зависимость между значениями величин на выходе и входе СИ, составленную в виде таблицы, графики или формулы.

На рисунке 10.5 показаны статические характеристики измерительных устройств.

За исключением специальных случаев, основное требование, предъявляемое к статической характеристике измерительных устройств, сводится к получению линейной зависимости между выходной величиной и входной величиной. На практике это требование реализуется в общем случае только с некоторой принятой заранее погрешностью.

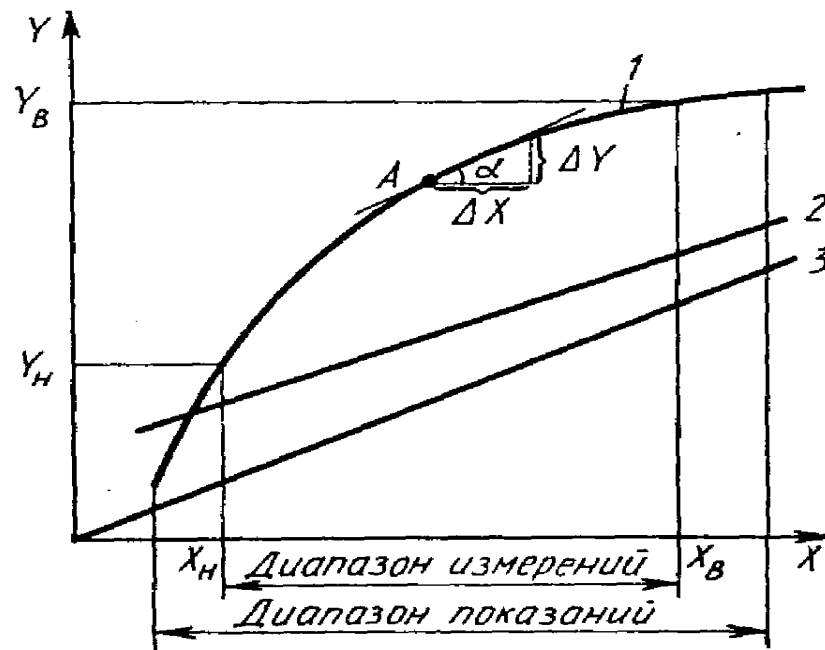


Рисунок 10.5 - Статическая характеристика измерительного устройства

Кроме статической характеристики для определения метрологических свойств измерительных устройств используется ряд параметров.

На рисунке 10.5 показаны статические характеристики 1, 2, 3 графически, где также графически указаны ранее упомянутые понятия - диапазоны показаний и диапазона измерений – (X_n , Y_n) - нижние пределы и – (X_v , Y_v) - верхние пределы.

Диапазон показаний - область значения шкалы, ограниченная конечным и начальным значением шкалы.

Диапазон измерений (рабочая часть шкалы) - область значений измеряемой величины (на шкале прибора), для которой нормированы допускаемые погрешности СИ - о чем Вы уже знаете из раздела о погрешностях!

В частном случае, когда Вы используете всю шкалу для измерений, указанные диапазоны могут совпадать.

Часто диапазон измерений называют **рабочим диапазоном преобразований**.

Верхний предел измерения - **наибольшим** значением диапазона измерений.

Нижний предел измерения - **наименьшим** значением диапазона измерений.

Из изложенного соотношения вытекает, что диапазон измерений определяется разностью значений верхнего и нижнего пределов измерений ($X_v - X_n$) и ($Y_v - Y_n$). Для количественной оценки влияния на выходной сигнал измерительного устройства входного сигнала в произвольной точке A статической характеристики служит предел отношения приращения dY выходного сигнала к приращению dX входного сигнала, когда последнее

стремится к нулю, т.е. производная в выбранной точке. Наглядно это видно из формулы (10.2) /8/

$$S = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX}, \quad (10.2)$$

Применительно к измерительным приборам этот параметр называют - **чувствительностью** и определяют как отношение значения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Графически она определяется тангенсом угла наклона **tg α** касательной к кривой характеристики, проведенной в выбранной точке А статической характеристики.

Если статическая характеристика измерительного прибора нелинейна (кривая 1 на рисунке 10.5), то его чувствительность будет различной в разных точках на кривой, а шкала прибора - неравномерной. Приборы с линейной характеристикой имеют шкалу равномерную в любой точке и также неизменную чувствительность - (прямые 2 или пропорциональная 3 на рисунке 10.5).

У измерительных преобразователей статистические характеристики, как правило, являются линейными (смотри формулу (10.3) /8/)

$$Y = K \cdot X, \quad (10.3)$$

где **K** - коэффициент преобразования (или при использовании преобразователя в системах автоматического регулирования - коэффициент передачи), определяемый как отношение сигнала на выходе измерительного преобразователя, отражающего измеряемую величину, к вызывающему его сигналу на входе преобразователя.

Для измерения прибора важным параметром является **цена деления**, определяемая как разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

Физически цена деления определяется количеством единиц входной величины, содержащихся в одном делении шкалы измерительного прибора.

Цена деления конечно связана с числом делений **n** шкалы измерительного прибора. Последнее в свою очередь связано с погрешностью измерительного прибора, обычно представляемой его классом точности **Λ**. Число делений шкалы измерительного прибора, как правило, в первом приближении определяется из соотношения показанного в формуле (10.4) /8/

$$n \geq \frac{10}{(2 \Lambda)}, \quad (10.4)$$

При выполнении условия (10.4) число делений шкалы выбирают таким, чтобы цена деления составляла целое число единиц измеряемой величины.

В НТД и в научно-технической литературе используется понятие **порога чувствительности** (порога реагирования) измерительного устройства, под которым понимают то наименьшее изменение входного сигнала, которое вызывает уверенно фиксируемое изменение выходного сигнала. Как правило, оператор, наблюдатель, осуществляющий измерение или контроль параметров, уверенно может заметить смещение стрелки на половину деления шкалы, поэтому порог чувствительности можно считать равным половине цены деления, а если учесть при этом соотношение (10.4), то в первом приближении порог чувствительности равен классу точности Λ . Одним из важных условий получения корректных результатов измерений является учет взаимодействия измерительных устройств между собой и с объектом измерений. При подключении измерительного устройства или преобразователя к объекту измерений он потребляет некоторую энергию или мощность от объекта. Аналогичная ситуация имеет место при подключении измерительного прибора или преобразователя к выходу предыдущего по цепи измерения преобразователя. Это определяет необходимость учитывать свойства измерительных устройств отбирать или отдавать энергию через свои входные или выходные цепи. И тогда, хотим мы этого или не хотим, электрические цепи прибора подчиняются законам электротехники. Поэтому, в качестве характеристики указанного свойства, принято использовать для измерительных устройств понятие – **входного импеданса** (полного или кажущегося сопротивления), а для измерительных преобразователей понятия входного и выходного **импедансов**. В общем случае под импедансом Z понимают отношение обобщенной силы N к обусловленной ею обобщенной скорости W . Импеданс вычисляется по формуле (10.5) /8/

$$Z = \frac{N}{W}, \quad (10.5)$$

В настоящее время понятие входного и выходного импедансов широко используется для электрических измерительных устройств, а так как применение вычислительных комплексов и управляемых вычислительных машин или также комплексов (УВМ, УВК) являются электронными средствами, то все более и более сфера электрических СИ в нашей жизни расширяется. При этом импеданс определяется как отношение напряжения к току (закон Ома). Применительно к измерительным устройствам для неэлектрических величин в каждом отдельном случае требуется проведение исследований для установления наиболее целесообразной формы представления входного и выходного импедансов и их соответствия масштабу измеряемых величин.

Динамические характеристики измеряемых устройств. Режим работы измерительного устройства, при котором значения выходного и входного

сигналов изменяются во времени, называют **динамическими** (нестационарными или неравновесными).

Практически все измерительного устройства имеют в своем составе инерционные элементы, а именно: подвижные механические узлы, электрические и пневматические емкости, индуктивности, элементы, обладающие тепловой инерцией и т.д. Наличие инерционных элементов определяет инерционность всего измерительного устройства. Это приводит к тому, что в динамическом режиме мгновенное значение выходного сигнала измерительного устройства зависит не только от мгновенного значения входного сигнала, но и от любых изменений этого сигнала, т.е. от его первой и второй производных и производных более высокого порядка. Указанные инерционные свойства измерительных устройств определяются динамической характеристикой.

Динамическая характеристика измерительного устройства в общем случае это зависимость между информационными параметрами выходного и входного сигналов и временем или зависимость выходного сигнала от входного в динамическом режиме.

Динамическую характеристику измерительного устройства принято описывать дифференциальным уравнением, передаточной или комплексной частотной функциями.

В подавляющем большинстве случаев динамическая характеристика измерительных устройств в линейной части статической характеристики (для измерительных устройств с линейной статической характеристикой во всем диапазоне преобразований) может быть описана дифференциальным уравнением (10.6) /8/

$$a_n \frac{d^n Y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY(\tau)}{d\tau} + Y(\tau) = KX(\tau), \quad (10.6)$$

или соответствующей **передаточной функцией** (10.7) или (10.8) /8/

$$W(P) = \frac{K}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1}, \quad (10.7)$$

либо

$$Y(P) = W(P) \cdot X(P), \quad (10.8)$$

где $Y(p)$ и $X(p)$ - выходной и входной сигналы измерительного устройства как функции времени;

n - число, определяющее порядок производной.

Передаточную функцию $W(p)$ из формулы (10.7) можно рассматривать как коэффициент преобразования измерительного устройства в динамическом режиме. Передаточная функция, как и дифференциальное уравнение, является исчерпывающей характеристикой инерционных свойств измерительного устройства. Она позволяет определять реакцию измерительного устройства на входные сигналы, изменяющиеся во времени по любому закону. Передаточную функцию измерительных устройств удобно использовать при анализе работы последних в автоматических системах регулирования. Ее определяют обычно через переходную или временную характеристику, которая определяется как изменение во времени выходного сигнала $h(t)$ измерительного устройства при подаче на его вход скачкообразного сигнала, равного по значению единице входной величины.

Если высота скачкообразного входного сигнала не равна единице, а имеет некоторое значение X_A , то по переходной характеристике можно определить выходной сигнал, используя выражение (10.9) /8/

$$Y(\tau) = h(\tau) \cdot X_A, \quad (10.9)$$

Для определения инерционных свойств измерительных устройств по переходным характеристикам обычно используют заимствованное из теории автоматического регулирования понятие динамического звена. Переходные характеристики и передаточные функции типовых динамических звеньев известны, что позволяет по форме переходной характеристики измерительного устройства отождествить его с каким-либо типовым динамическим звеном, а, следовательно, определить форму передаточной функции используемого измерительного устройства. Описанную процедуру принято называть идентификацией.

На нижеприведенном рисунке 10.6 показаны типичные для измерительных устройств формы переходных процессов, или *кривые разгона*.

Для получения этих процессов, в нулевой (для простоты) момент времени, входной сигнал измерительного устройства скачком изменяется на величину X_a от некоторого значения X_1 до X_2 , как на рисунке 10.6 а. По окончании переходного процесса выходной сигнал измерительного устройства изменяется на величину Y_a от значения Y_1 до Y_2 . Для определения коэффициента преобразования K измерительного устройства достаточно вычислить отношение Y_a/X_a . Переходные процессы, показанные на рисунке 10.6 б, 10.6 в, 10.6 г, соответствуют типовым усилительному (безнерционному), апериодическому первого порядка и колебательному звеньям /8/.

Процесс, представленный на рисунке 10.6 б, характерен для электронных измерительных устройств, а процессы, представленные на рисунке 10.6 в и 10.6 г - для большого числа измерительных устройств, основанных на прямом преобразовании. Кривая на рисунке 10.6 в) представляет собой экспоненту, а величина T (подкасательная) называется **постоянной времени**. Она определяет собой время, за которое выходной сигнал достиг бы

нового установившегося значения, если бы изменялся с постоянной скоростью, равной скорости в момент скачкообразного изменения входного сигнала.

Постоянная времени используется для характеристики динамических свойств измерительных устройств. Проведение касательной и кривой переходного процесса сопряжено с погрешностями, поэтому значения постоянной времени определяют как интервал времени, за который выходной сигнал изменяется на 0,632 от своего приращения Y_a на рисунке 10.6 в. Корректность такого определения легко доказывается математически, но мы этого сейчас делать не будем, так как курс лекций очень сокращен. Колебательное динамическое звено, а следовательно, и измерительное устройство, в котором имеет место переходный процесс, показанный на рисунке 10.6 г, можно рассматривать как соединение двух апериодических звеньев с постоянными времени T_1 и T_2 . При этом в зависимости от соотношений T_1 и T_2 , переходный процесс будет различен. Если $(T_1/T_2) < 2$, то он имеет форму кривых 1 и 2, а при $(T_1/T_2) > 2$ - форму кривой 3 на рисунке 10.6 г. Переходные процессы, показанные на рисунках 10.6 д и 10.6 е, характерны для случаев, когда дифференциальное уравнение, описывающее динамику измерительного устройства, имеет порядок более чем второй. В этих случаях принято рассматривать измерительное устройство как совокупность нескольких, соединенных последовательно типовых динамических звеньев. Например, измерительное устройство с переходным процессом, показанным на рисунке 10.6 д, можно рассматривать как соединение звена чистого запаздывания со временем запаздывания t_z и апериодического звена с постоянной времени T (для графического определения значений t_z и T достаточно провести касательную к точке А на рисунке 10.6 д. Измерительное устройство с переходным процессом, показанным на рисунке 10.6 е, можно рассматривать как соединение звена чистого запаздывания и колебательного звена. Для всех измерительных устройств важным является время установления выходного сигнала (или показаний) T_n на рисунке 10.6, которое также называют временем реакции. Оно определяет собой отрезок времени, необходимый для завершения переходного процесса при скачкообразном изменении входного сигнала. Все рассмотренные переходные процессы на рисунке 10.6 теоретически заканчиваются только при бесконечном значении времени. Поэтому, за время реакции T_n обычно принимают время, за которое выходной сигнал измерительного устройства, приближаясь к новому установившемуся значению, входит в некоторую зону, отличающуюся от этого значения на (плюс, минус) 5 % от изменения выходного сигнала, соответствующего данному скачкообразному входному сигналу. Значение времени реакции может быть приближено определено через постоянную времени измерительного устройства из соотношения (10.10) /8/

$$T_n = (3 \div 5) T, \quad (10.10)$$

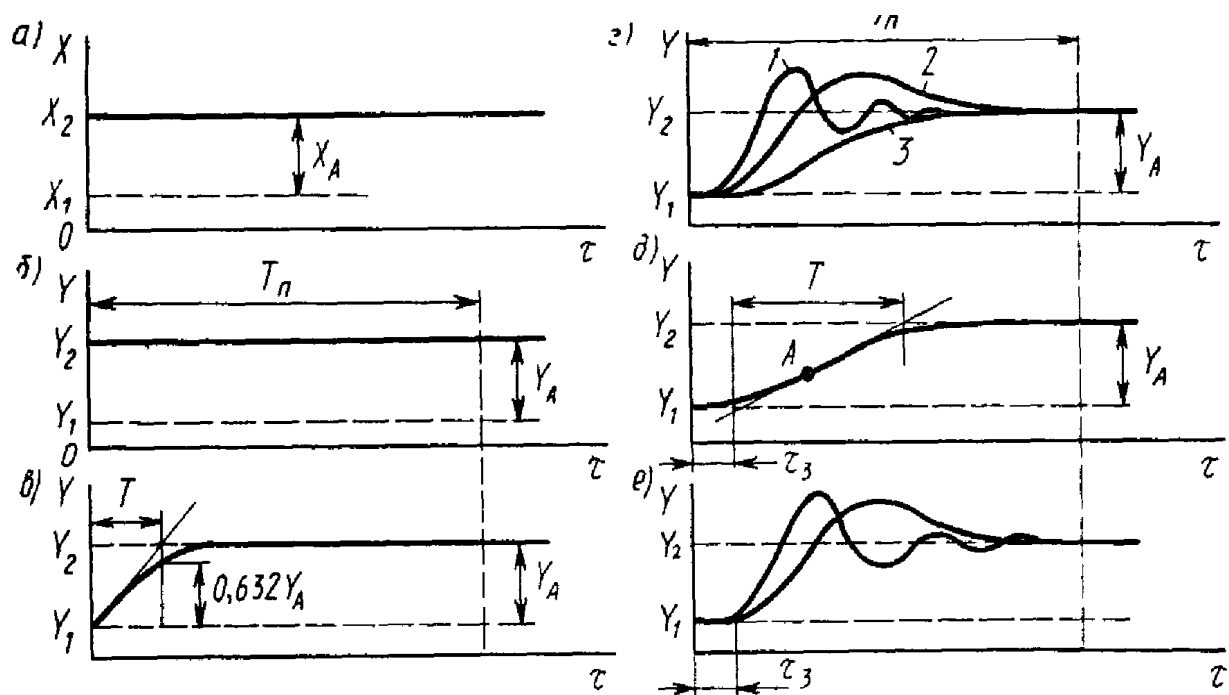


Рисунок 10.6 - Типичные формы переходных процессов для измерительных устройств

Дифференциальные уравнения и передаточные функции рассмотренных наиболее типичных по инерционным свойствам измерительных устройств приведены в таблицу 10.1.

Таблица 10.1 – Дифференциальные уравнения и передаточные функции, наиболее типичные по инерционным свойствам измерительных устройств

Кривая переход процесса	Дифференциальное уравнение	Передаточная функция
1	2	3
Рисунок 10.6 б	$Y(\tau) = K \cdot X(\tau)$	K
Рисунок 10.6 в	$T \frac{dY(\tau)}{d\tau} + Y(\tau) = K \cdot X(\tau)$	$\frac{K}{T \cdot p + 1}$
Рисунок 10.6 г	$T_2^2 \cdot \frac{d^2 Y(\tau)}{d\tau^2} + T_1 \cdot \frac{dY(\tau)}{d\tau} + Y(\tau) = K \cdot X(\tau)$	$\frac{K}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
Рисунок 10.6 д	$T \frac{dY(\tau)}{d\tau} + Y(\tau) = K \cdot X(\tau - \tau_3)$	$\frac{K}{T \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_3 p}$
Рисунок 10.6 е	$T_2^2 \frac{d^2 Y(\tau)}{d\tau^2} + T_1 \frac{dY(\tau)}{d\tau} + Y(\tau) = K \cdot X(\tau - \tau_3)$	$\frac{K}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_3 p}$

Мы уже знакомы с методами измерений, но с применением измерительных устройств этот раздел имеет небольшое отличие и в то же время схожесть. Еще раз кратко их перечисляю:

- метод непосредственной оценки;
- метод сравнения с мерой;
- дифференциальный метод;
- нулевой метод;
- метод замещения;
- метод совпадения (или метод «нониуса») при его схожести, отметим его отличительность: В данном случае применяются две меры с разными ценами деления, которые отличаются на размер оцениваемого разряда отсчетов, но при условии, что в приборе применяется две шкалы - одна неподвижная - отсчетная и другая - подвижная - показывающая, но чем - то схожая со шкалами штангенциркуля!

Пусть имеем одну калиброванную меру с ценой деления ΔX_1 и изменяемую величину ΔX , которая меньше цены деления. В этом случае используется вторая мера с ценой деления ΔX_2 . Таким образом, если чувствительность необходимо увеличить в «n» раз, то соотношение между ними будет иметь вид формулы (10.11) /11/

$$\Delta X_{K_K} = \Delta X_{K_1} \left(1 - \frac{1}{n} \right), \quad (10.11)$$

В частности, при $n = 10$ соотношение имеет вид формулы (10.12) /11/

$$\Delta X_{K_2} = 0,9 \Delta X_{K_1} \quad (10.12)$$

Для того чтобы были понятны формулы, приведем рисунок 10.7, на котором изображены эти шкалы

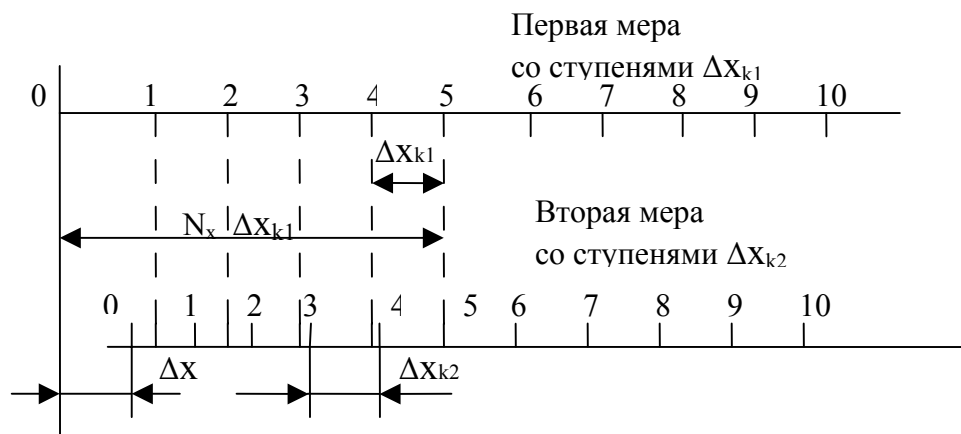


Рисунок 10.7 - «Нониусный» метод измерения

Измеряемую величину ΔX устанавливают между нулевыми отметками мер и находят число N_X , равное номеру совпавших рисок деления мер, как на рисунке. В этом случае справедливо соотношение:

$$N_X \cdot \Delta_{X_{K1}} = \Delta_X + N_X \cdot \Delta_{X_{K2}},$$

откуда:

$$\Delta_X = N_X (\Delta_{X_{K1}} - \Delta_{X_{K2}}) = N_X (\Delta_{X_{K1}} - 0,9\Delta_{X_{K1}}) = N_X 0,1\Delta_{X_{K1}},$$

Метод «нониуса» находит широкое применение при измерении временных интервалов двух близких частот (биений) и в других случаях.

В настоящее время существует еще и классификация методов измерительных преобразований, основанная на концепции измерительных преобразований. Любой измерительный процесс представляет собой последовательное преобразование сигнала измеряемой величины в величину, ради которой была поставлена задача измерения. В связи с этим любое СИ представляется как последовательно соединенные звенья, передающие сигнал измерительной информации от входа к выходу и образующие как бы канал преобразования. Тогда, в общем случае, любой метод измерения можно представить как последовательное преобразование измеряемой информации в вид, удобный для восприятия наблюдателем. В зависимости от состава результирующей погрешности и погрешности отдельных преобразователей различают методы прямого и уравнивающего преобразований.

При методе прямого преобразования входной параметр последовательно проходит все преобразователи разомкнутой цепи преобразования и по выходному отсчетному устройству оценивается результат измерения (здесь движение информации происходит только в одну сторону). Погрешность такого средства измерения полностью определяется погрешностью всех преобразователей цепи преобразования. При методе уравнивающего преобразования в измерительных устройствах существует, как минимум, два канала преобразования: прямой и обратный. Выход канала прямого преобразования (КПП) подается на вход отсчетного устройства и одновременно на вход канала обратного преобразования (КОП), предназначенного для преобразования выходного сигнала КПП в величину, аналогичную по физической природе входной величине; на вход КПП подается разность между измеряемой величиной и выходным сигналом КОП. Результирующая погрешность такой структуры практически полностью определяется погрешностью КОП (влияние КПП ничтожно мало при соответствующем выборе коэффициента его преобразования). Метод прямого преобразования аналогичен методу непосредственной оценки, а метод уравнивающего

преобразования - нулевому методу и, иногда, методу совпадения с нулевым одновременно при общепринятой классификации методов измерений /11/.

10.1 Погрешности измерительных устройств

Инструментальная погрешность (приводилась в таблице ранее) имеет определенное значение для наиболее распространенных технических измерений. Для измерительных устройств приводится особая классификация погрешностей измерений по ряду признаков. По характеру проявления при повторных измерениях одного и того же значения физической величины принято выделять систематическую и случайную погрешности (или составляющие погрешности) измерительных устройств. В эти понятия в основном вкладывается тот же смысл, что и в понятия систематической и случайной погрешностей простых или прямых измерений. Особенность здесь состоит в том, что всякое измерительное устройство предназначается для

несения в исследуемый технологический процесс ясной определенности (т.е. знание того, что происходит сейчас и, что было за истекшие сутки), а наличие случайной составляющей погрешности приводит к неоднозначности и к путанице в представлениях технологов. В связи с этим первая задача, которая обычно решается при создании измерительных устройств, состоит в том, чтобы случайную погрешность сделать незначительной. Если это условие выполняется, а элементы, входящие в состав измерительного устройства, работают стабильно, можно путем градуировки обеспечить достаточно малые систематические погрешности измерительного устройства.

Рассмотренная на рисунке 10.8 концепция используется как основная при создании рабочих средств измерений и, в частности, измерительных устройств для технологических измерений в производстве продукции.

В зависимости от условий применения измерительных устройств различают основную и дополнительную погрешности (см. рисунок 10.8).

Основной погрешностью измерительных устройств в комплексе с СИ называют погрешность при использовании их в нормальных условиях (производилось выше).

Дополнительной погрешностью называют изменения его погрешности, вызванной отклонением одной из влияющих величин (факторов влияния) от нормативного значения работы измерительного устройства или его выхода за пределы нормальной работы в области значений характеристик. Дополнительная погрешность может быть вызвана сразу несколькими факторами влияющих величин, и в практике работы операторов и слесарей КИПиА важно не растеряться, а быстро сориентироваться и устранить эти факторы так, чтобы измерительное устройство вошло в стабильный режим измерения и регулирования технологического процесса!

Функцией влияния - называется зависимость изменения какой-либо метрологической характеристики СИ и в целом измерительного устройства от изменений влияющих факторов величин или их совокупности.

Иными словами, дополнительная погрешность - это часть погрешности, которая добавляется (имеется в виду алгебраическое сложение) к основной в случаях, когда измерительное устройство применяется в рабочих условиях.

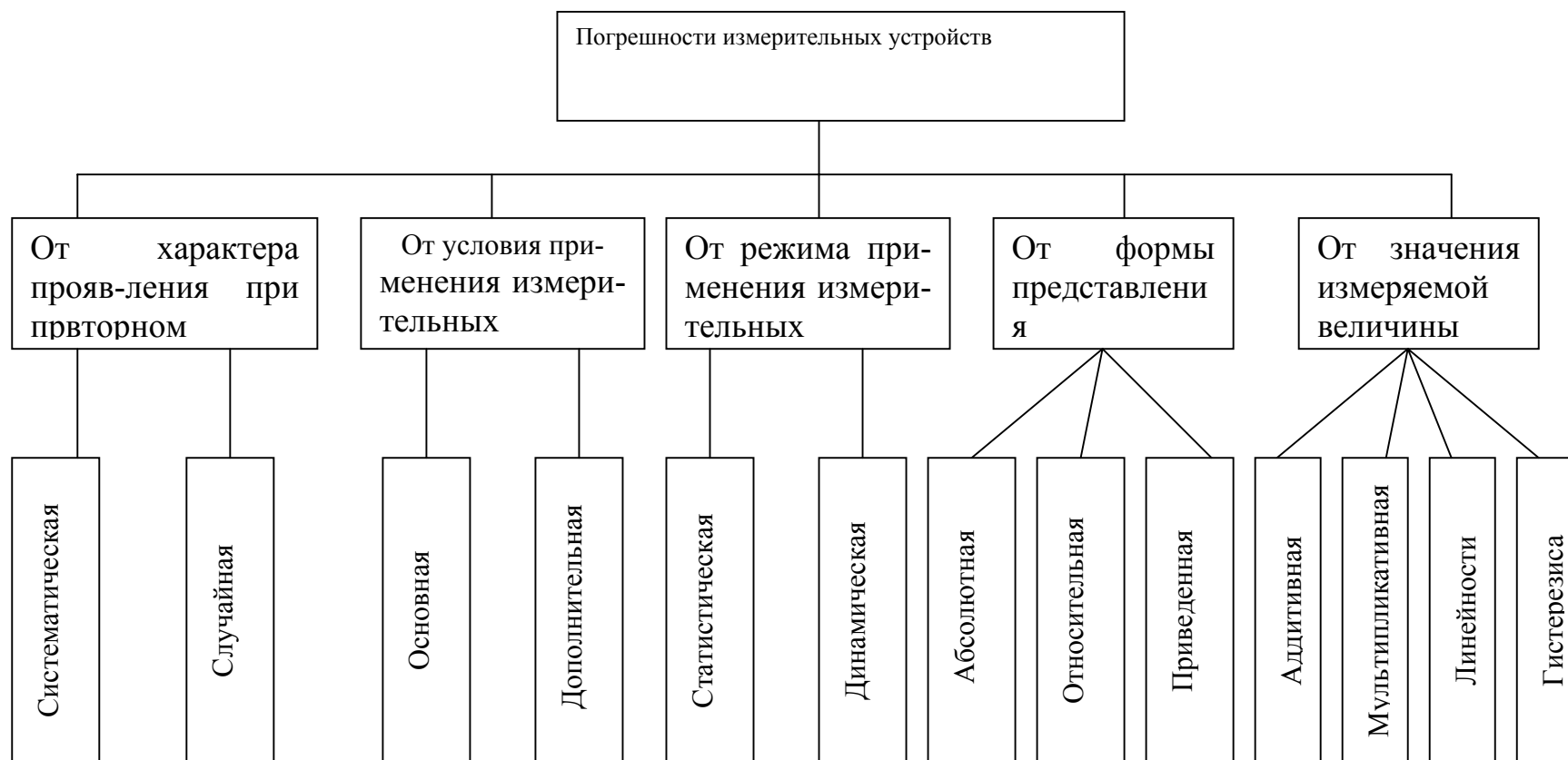


Рисунок 10.8 – Погрешности измерительных устройств

Рабочие условия обычно таковы, что изменения значений влияющих величин для них существенно больше, чем для нормальных условий, т.е. область рабочих (часть этой области называют расширенной областью) условий включает в себя область нормальных условий.

В некоторых случаях основная погрешность измерительных устройств определяется для рабочей области изменения значений влияющих величин. В этих случаях понятие дополнительной погрешности теряет смысл.

В зависимости от режима применения различают статическую и динамическую погрешности измерительных устройств (см. приложение А).

По форме представления (в приведенной таблице это видно) принято различать абсолютную, относительную и приведенную погрешности измерительных устройств. Для измерительных устройств, приборов, преобразователей определение этих погрешностей специфично, т.е. особенные как бы определения, присущие только им. У измерительных приборов имеется шкала, отградуированная в условных единицах с известным множителем шкалы, который обозначается под шкалой, поэтому результат измерения представляется в единицах входной величины с учетом этого множителя. Это обуславливает простоту определения погрешности измерительных приборов.

Абсолютная погрешность измерительного прибора - « Δ » называется разность показаний прибора $X_{\text{п}}$ и истинного (действительного) $X_{\text{д}}$ значения измеряемой величины. Она вычисляется по формуле (10.13) /8/

$$\Delta = X_{\text{п}} - X_{\text{д}} \quad (10.13)$$

Действительное значение определяется с помощью образцового прибора или воспроизводится мерой.

Относительная погрешность измерительного прибора - « δ » называется отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к действительному значению измеряемой величины.

Относительную погрешность выражают обычно в процентах и вычисляют по формуле (10.14) /8/

$$\delta = \Delta \cdot 100 / X_{\text{д}} \quad (10.14)$$

Так как $\Delta \ll X_{\text{д}}$ или $X_{\text{п}}$, то в выражении (10.14) вместо значения $X_{\text{д}}$ может быть использовано значение $X_{\text{п}}$.

Приведенной погрешностью измерительного приборов - « γ » называется отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению $X_{\text{Н}}$. Приведенную погрешность выражают также в процентах и вычисляют по формуле (10.15) /8/

$$\gamma = \Delta \cdot 100 / X_{\text{Н}} \quad (10.15)$$

В качестве нормирующего значения используется верхний предел измерений, диапазон измерений и т.д., то есть формулу (10.15) можно преобразовать в формулу (10.16) /8/

$$\gamma = \Delta \cdot 100 / (X_v - X_n) \quad (10.16)$$

У измерительных преобразователей результаты измерений представляются в единицах выходной величины. В связи с этим для измерительных преобразователей принято различать погрешности по входу и выходу. При определении этих погрешностей необходимо знать приписанную данному измерительному преобразователю функцию преобразования (градуировочную характеристику) $\gamma = f(X)$.

Абсолютной погрешностью измерительного преобразователя по выходу Δy называется разность между действительным значением величины Y_n на выходе преобразователя, отражающей измеряемую величину, и значением Y_d величины на выходе, определяемым по действительному значению величины на входе с помощью градуировочной характеристики, приписанной преобразователю. Она вычисляется по формуле (10.17) /8/

$$\Delta y = Y_n - Y_d \quad (10.17)$$

где Y_n - знач. выходного сигнала преобразователя при определенном значении входного сигнала;

Y_d - значение выходного сигнала, который должен вырабатываться преобразователем, лишенным погрешности, при том же значении входного сигнала.

Значение Y_n определяют с помощью рабочего эталона (образцового средства измерений), а значение Y_d рассчитывают с помощью функции преобразования (формула (10.18) /8/) по действительному значению входной величины X_d , которое воспроизводится мерой или определяется с помощью соответствующего рабочего эталона (образцового средства измерений):

$$Y_d = f(X_d) \quad (10.18)$$

Из формул (10.17) и (10.18) находят (10.19) /8/

$$\Delta y = Y_n - f(X_d) \quad (10.19)$$

Абсолютной погрешностью измерительного преобразователя по входу Δx называется разность между значением X_n величины на входе преобразователя, определяемым по действительному значению Y_d величины на выходе с помощью градуировочной характеристики, приписанной преобразователю, и действительным значением X_d величины на входе преобразователя. Она вычисляется по формуле (10.20) /8/

$$\Delta x = X_{\Pi} - X_{\Delta} \quad (10.20)$$

Значение X_{Δ} определяется с помощью соответствующего рабочего эталона (образцового средства измерений) или воспроизводится мерой, а значение X_{Π} определяется по значению Y_{Π} выходного сигнала с помощью функции преобразователя, решенной относительно X , т.е. $X_{\Pi} = \varphi(Y_{\Pi})$ (φ - символ обратной функции преобразования).

Таким образом, подставляя значение X_{Π} в формулу (10.20) мы получаем формулу (10.21) /8/

$$\Delta x = \varphi(Y_{\Pi}) - X_{\Delta} \quad (10.21)$$

Относительной погрешностью измерительного преобразователя по входу (выходу) - называют отношение абсолютной погрешности измерительного преобразователя по входу (выходу) к действительному значению величины на входе по градуировочной характеристике, приписанной преобразователю. Вычисления проводят по формулам (10.22), (10.23) /8/

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{X_{\Delta}} \cdot 100 = \frac{\varphi(Y_{\Pi}) - X_{\Delta}}{X_{\Delta}} \cdot 100, \quad (10.22)$$

$$\delta_y = \frac{\Delta Y}{Y_{\Delta}} \cdot 100 = \frac{Y_{\Pi} - f(X_{\Delta})}{f(X_{\Delta})} \cdot 100, \quad (10.23)$$

где δ_x и δ_y - относительная погрешность по входу и выходу соответственно.

Приведенной погрешностью измерительного преобразователя по входу (выходу) называют отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению входного X_N (выходного Y_N) сигнала. Вычисление погрешности по входу (выходу) проводят по формулам (10.24) и (10.25) /8/

$$\gamma_x = \frac{\Delta_x}{X_N} \cdot 100 = \frac{\varphi(Y_{\Pi}) - X_{\Delta}}{X_N} \cdot 100, \quad (10.24)$$

$$\gamma_y = \frac{\Delta_Y}{Y_N} \cdot 100 = \frac{Y_{\Pi} - f(X_{\Delta})}{Y_N} \cdot 100, \quad (10.25)$$

где γ_x и γ_y - приведенная погрешность измерительного преобразователя по входу и выходу соответственно.

Обычно в качестве нормирующего значения используется диапазон измерений преобразователя ($X_B - X_H$) или соответствующий ему диапазон измерений выходного сигнала ($Y_B - Y_H$). Тогда формулы (10.24) и (10.25) будут выглядеть следующим образом /8/

$$\gamma_x = \frac{\varphi(Y_{\Pi}) - X_D}{X_B - X_H} \cdot 100, \quad (10.26)$$

$$\gamma_y = \frac{Y_{\Pi} - f(X_D)}{Y_B - Y_H} \cdot 100, \quad (10.27)$$

$$\gamma_x = \frac{(Y_{\Pi} - Y_H) / (K + X_H - X_D)}{X_B - X_H} \cdot 100, \quad (10.28)$$

$$\gamma_y = \frac{Y_{\Pi} - K(X_D - X_H) - Y_H}{Y_B - Y_H} \cdot 100, \quad (10.29)$$

где K - коэффициент преобразования измерительного преобразователя, определяемый отношением $(Y_B - Y_H)/(X_B - X_H)$.

Чрезвычайно важно для применения измерительных устройств и правильной оценки погрешности измерений, получаемой при их использовании, являются сведения о зависимости погрешности от значения измерительной величины в пределах диапазона измерений, а также сведения об изменениях этой погрешности под действием влияющих величин.

Зависимость погрешности от значения измеряемой величины определяется принятой конструкцией (схемой) и технологией изготовления измерительного устройства. Для рассмотрения этих зависимостей удобно использовать понятие номинальной и реальной функций преобразователя измерительного устройства.

Номинальной (или идеальной) функцией преобразователя называется функция, которая приписана измерительному устройству данного типа, указанных в его паспорте и используется при выполнении с его помощью измерений.

Реальной функцией преобразователя называется функция, которой обладает конкретный экземпляр измерительного устройства данного типа.

Из-за несовершенства конструкций и технологий изготовления измерительных устройств реальная функция преобразования отличается от номинальной. Это отличие и определяет природу погрешностей данного измерительного устройства. Отклонения реальной характеристики от номинальной различны и зависят от значений измеряемой величины по всей шкале. По этому признаку погрешности принято разделять на аддитивную, мультипликативную, линейности и гистерезиса.

Графическое образование перечисленных погрешностей показано на следующем рисунке 10.9.

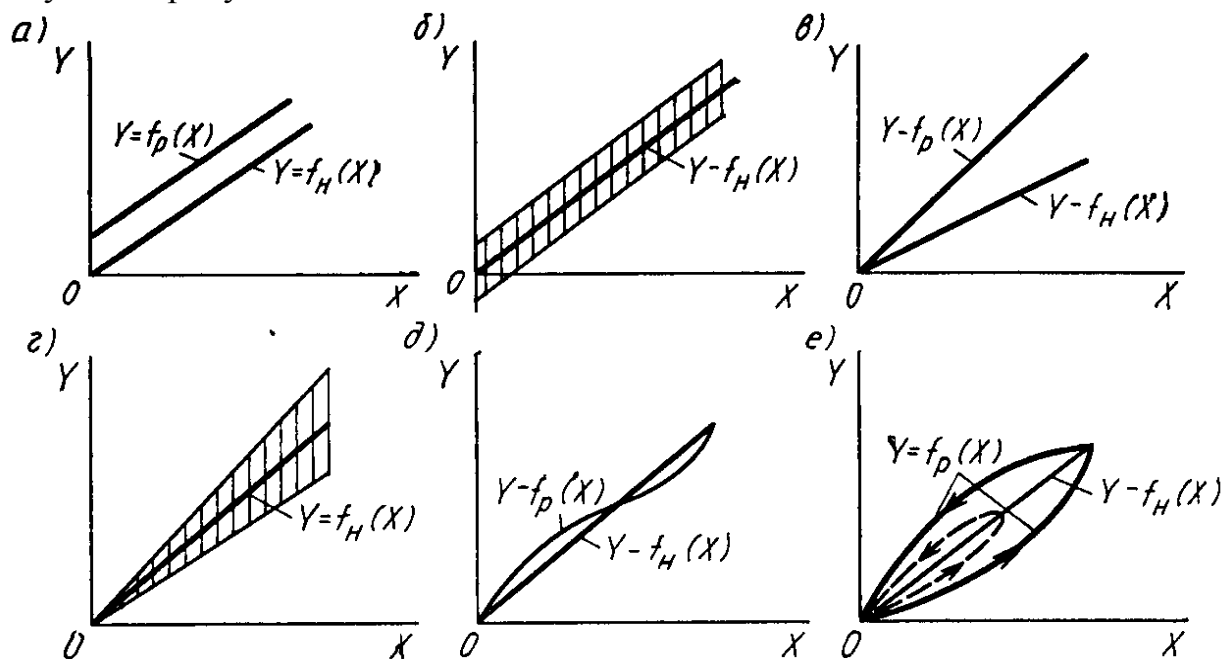


Рисунок 10.9 – Реальные функции преобразования измерительных устройств

Аддитивной погрешностью или погрешностью нуля измерительного устройства (получаемых путем сложения) называется погрешность, которая остается постоянной при всех значениях измеряемой величины.

На рисунке 10.9 а показана величина, где реальная функция несколько смещена относительно номинальной, т.е. выходной сигнал измерительного устройства при всех значениях X будет больше или меньше на одну и ту же величину, чем он должен быть, в соответствии с номинальной функцией преобразования. Если аддитивная погрешность является систематической, то она может быть устранена. Для этого в измерительных устройствах имеется специально настроенный узел (корректор) нулевого значения выходного сигнала. Но если аддитивная погрешность случайная, то ее нельзя исключить, а реальная функция преобразования смещается по отношению к номинальной функции во времени произвольным образом. При этом для реальной функции преобразования можно определить некоторую полосу рисунок 10.9 б, ширина которой остается постоянной при всех значениях измеряемой величины.

Возникновение случайной аддитивной погрешности обычно вызвано трением в опорах, контактными сопротивлениями, дрейфом нуля, шумом и фоном измерительных устройств (смотри приложение А).

Мультипликативной (получаемой путем умножения), или **погрешностью чувствительности** измерительных устройств, называется погрешность, которая линейно возрастает (или убывает) с увеличением измеряемой величины. Это хорошо просматривается на рисунке 10.9 в. При случайной, мультипликативной погрешности, на реальной функции она представляется некоторой угловой полосой, смотри на рисунке 10.9 г. Причинами мультипликативных погрешностей являются изменения коэффициентов преобразования отдельных элементов и узлов измерительных устройств.

На рисунке 10.9 д показано взаимное расположение номинальной и реальной функций преобразования измерительных устройств. Это бывает в случае, когда отличие этих функций вызвано нелинейными эффектами. В таких случаях эту погрешность называют погрешностью линейности, а причины ее могут быть конструктивными от схем, связанными с несовершенством электронных элементов в технологии их изготовления и их нелинейных собственных характеристик. Наиболее затруднительной является погрешность гистерезиса (в переводе с греческого языка - запаздывание) или погрешность обратного хода, выражающаяся в несовпадении реальной функции преобразования измерительного устройства при увеличении - (прямой ход туда) и уменьшения (обратный ход оттуда) измеряемой величины на рисунке 10.9 е.

Причинами гистерезиса являются: люфт, сухое трение в механических узлах, гистерезисный эффект в ферромагнитных материалах, внутреннее трение в материалах пружин, явление упругого последствия в упругих чувствительных элементах, явление поляризации в электрических, пьезоэлектрических и электрохимических элементах и т.д. Существенным при этом является тот факт, что форма получаемой петли реальной функции преобразования зависит от предыстории, а именно от значения измеряемой величины, при котором после постепенного увеличения последней начинается ее уменьшение (на рисунке 10.9 е это показано пунктирными линиями). Для количественной оценки погрешности гистерезиса посмотрим следующий рисунок 10.10.

Здесь показан фрагмент взаимного расположения реальной и номинальной функций преобразования измерительного устройства, обладающего погрешностью гистерезиса. Под действием влияющих величин реальная функция преобразования изменяет свое расположение и форму. На рисунке 10.10 а показаны два ее расположения, нанесенные сплошной и пунктирной линиями. При нормальных условиях эксплуатации измерительные устройства все изменения формы реальной функции преобразования не выходят за пределы заштрихованных полос как для верхней, так и для нижней ее ветвей.

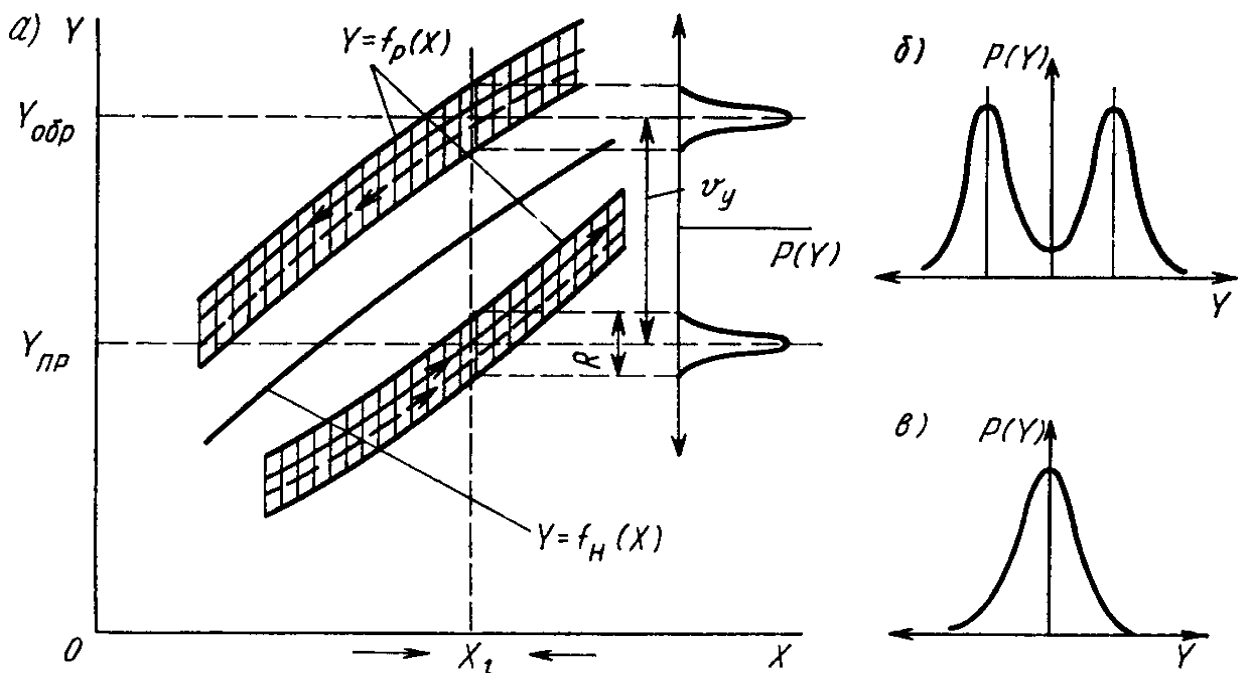


Рисунок 10.10 - Взаимное расположение реальной и номинальной функций преобразования измерительного устройства, обладающего погрешностью гистерезиса

Если влияющие величины, вызывающие изменения положения и формы функции преобразования, при измерении не выявляются, то рассматриваемое явление определяется как невоспроизводимость и характеризует случайную погрешность измерительного устройства. При этом используют понятие «размах» и «вариация».

Размахом (непостоянством) R выходного сигнала измерительного преобразователя (показаний измерительного прибора) называется разность между наибольшим значением и наименьшим значением выходного сигнала. Этот «размах» соответствует одному и тому же значению измеряемой величины и полученными при многократном и одностороннем подходе к этому значению, т.е. при постепенном увеличении или уменьшении измеряемой величины (только при прямом или только при обратном ходе).

Размах характеризует ширину заштрихованных на рисунке 10.10 а полос, определяющих случайную погрешность при значении измеряемого параметра, равном X_i .

Вариацией V_y выходного сигнала измерительного преобразователя (показаний измерительного прибора) называют среднюю разность между значениями выходного сигнала, соответствующими одному и тому же значению измеряемой величины, полученными при многократном и двустороннем подходе к этому значению, т.е. при постепенном увеличении и последующем уменьшении измеряемой величины (иначе говоря, при прямом и обратном ходе).

Как видно из рисунка 10.10 а, при одном и том же значении измеряемой величины X_i закон распределения выходного сигнала измерительного

устройства при наличии вариации является двух модальным. Если размахи для нижней и верхней ветвей функции преобразования перекрываются, то закон распределения выходного сигнала имеет вид, показанный на рисунке 10.10 б. Форма функций преобразования с законами распределения на рисунках 10.10 а, 10.10 б является наиболее типичными для рабочих измерительных устройств, в том числе для устройств, используемых при технологических измерениях. В частном случае при отсутствии вариации закон распределения выходного сигнала является одномодальным или нормальным на рисунке 10.10 в. Абсолютное значение вариации определяется для измерительных приборов v_x и преобразователей v_y соответственно из выражения (10.30), (10.31) /8/

$$v_x = X_{ПР} - X_{ОБР}, \quad (10.30)$$

$$v_y = Y_{ПР} - Y_{ОБР}, \quad (10.31)$$

где $X_{ПР}$ и $X_{ОБР}$ - показания измерительного прибора при прямом и обратном ходе;

$Y_{ПР}$ и $Y_{ОБР}$ - выходной сигнал измерительного преобразователя при прямом и обратном ходе.

Приведенное значение вариации обычно определяется для измерительных приборов W_X и преобразователей W_Y соответственно из выражений (10.32) и (10.33) /8/

$$W_X = \frac{v_x}{X_B - X_H} \cdot 100 = \frac{(X_{ПР} - X_{ОБР})}{X_B - X_H} \cdot 100, \quad (10.32)$$

$$W_Y = \frac{v_y}{Y_B - Y_H} \cdot 100 = \frac{(Y_{ПР} - Y_{ОБР})}{Y_B - Y_H} \cdot 100, \quad (10.33)$$

т.е. определяется как отношение абсолютное значения вариации к диапазону измерения по входу или по выходу измерительного устройства.

Использование приведенных представлений о номинальной и реальной функциях преобразования позволяет наглядно отразить изменения погрешностей измерительных устройств под действием влияющих величин.

Предположим, что при эксплуатации некоторого измерительного устройства в нормальных условиях его реальная функция преобразования имеет вид петлеобразной кривой 1 на рисунке 10.11, где заштрихованная полоса определяет случайную погрешность, вызванную изменением влияющих величин в допустимых нормальными условиями пределах. При этом обычно для измерительного устройства устанавливается значение основной погрешности. На рисунке это показано графически в виде полосы шириной $(+\Delta, -\Delta)$ и т.д. Если измерительное устройство эксплуатируется в рабочих условиях,

когда значение одной или нескольких влияющих величин выходят за пределы, функция преобразования выходит за установленное для данного измерительного устройства значение полосы основной погрешности петлеобразная кривая 2 на рисунке 10.11, т.е. появляется дополнительная погрешность.

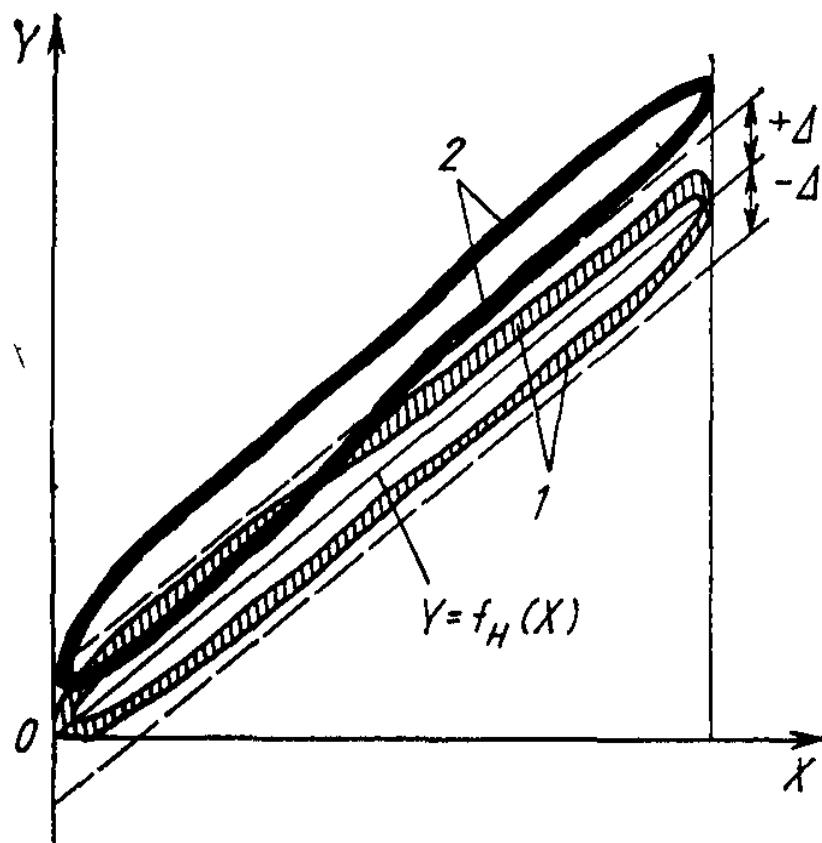


Рисунок 10.11 - Смещение реальной функции преобразования при эксплуатации измерительного устройства в рабочих условиях.

11 Нормирование метрологических характеристик

Мы с Вами рассмотрели множество характеристик измерительных устройств, которые принято называть метрологическими, так как они влияют на точность осуществляемых с помощью этих устройств измерений. СИ и измерительного устройства допускаются к применению только в том случае, если установлены нормы - нормированы их метрологические характеристики. Сведения о них приводятся в технической документации на средства измерений, государственном стандарте на технические условия СИ, прошедших испытания типа и попавших в регистрацию государственного реестра по Российской Федерации, также стран независимых государств, а также стран государств, имеющих разрешение на импорт в Российскую Федерацию. Для удобства использования, анализа и нормирования метрологических характеристик СИ, их удобно классифицировать на группы, приведенные в следующую таблицу 11.1.

Таблица 11.1 - Метрологические характеристики измерительных устройств

Группа метрологических характеристик	Метрологические характеристики
Характеристики, предназначенные для определения результата измерений	Функция преобразования, коэффициент преобразования, цена деления, чувствительность, диапазон измерения, верхний и нижний пределы измерений, диапазон показаний, конечное и начальное значение шкалы прибора
Характеристики погрешности	Систематическая погрешность, случайная погрешность, основная погрешность, динамическая погрешность, порог чувствительности, мультипликативная погрешность, аддитивная погрешность, погрешность линейности, вариация, абсолютная, относительная и приведенная погрешности
Характеристики чувствительности к влияющим величинам	Функции влияния, дополнительная погрешность, изменение показаний, изменение коэффициента преобразований, значения неинформативного параметра выходного сигнала
Динамические характеристики	Дифференциальное уравнение, передаточная функция, комплексная частотная функция, переходная характеристика, импульсная переходная характеристика, амплитудно-фазовая характеристика, постоянная времени, время реакции, амплитудно-частотная характеристика, фазово-частотная характеристика, полоса пропускания и так далее, и др.
Характеристики взаимодействия с подключаемыми средствами измерений	Входное общее сопротивление (импеданс), выходное общее сопротивление (импеданс)

Посредством нормирования метрологических характеристик обеспечивается взаимозаменяемость СИ и единство измерений в государственном масштабе. Реальные значения метрологических характеристик СИ определяются при их изготовлении, а затем периодически поверяются (калибруются) в процессе эксплуатации. При наличии отклонений хотя бы одной нормируемой метрологической характеристики от нормы СИ регулируется, подвергается аресту из сферы эксплуатации и ремонтируется, затем калибруется или поверяется. Если восстановить метрологические

характеристики у СИ путем указанных мероприятий не удастся, то СИ бракуется, изымается из обращения эксплуатации и уничтожается.

Выбор нормируемых метрологических характеристик из числа приведенных в таблице зависит от вида СИ и осуществляется в процессе разработки, освоения производства и аттестации СИ данного типоразмера по ГСИ.

Общий подход при нормировании метрологических характеристик состоит в том, что для всех нормируемых функций и значений устанавливаются номинальные функции и номинальные значения, и пределы допустимых отклонений (например, номинальная функция преобразования, номинальная функция влияния, номинальное значение информативного параметра на выходе, номинальное значение постоянной времени и т. д.). Для остальных характеристик устанавливаются пределы допустимых значений (например, пределы допускаемой основной погрешности, пределы допускаемой вариации и т.п.). Определенную специфику имеет нормирование характеристик, определяющих точность измерений, выполняемых с помощью данного средства измерений (основная и дополнительная погрешности, размах, вариация).

Основная погрешность устройства для технологических измерений нормируется путем установления предела допускаемой абсолютной, относительной или приведенной погрешности, которые вычисляются по формулам (11.1), (11.2), (11.3) соответственно /8/

$$\Delta = \pm a \text{ или } \Delta \pm (a + bx), \quad (11.1)$$

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X} \cdot 100 = \pm c \text{ или } \delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_K}{x} - 1 \right) \right], \quad (11.2)$$

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{X_H} = \pm b, \quad (11.3)$$

где X - входной сигнал измерительного устройства.

Нормирующее значение X_H в выражении (11.3) принимают равным диапазону измерений (для многих измерительных устройств, в том числе для большинства устройств, используемых для технологических измерений), конечному значению шкалы, длине шкалы, если последняя имеет резко изменяющееся деление.

Способ задания пределов допускаемой основной погрешности для измерительных приборов и преобразователей определяется зависимостью их погрешности от значения измеряемой величины и требованиями простоты. Если у измерительных устройств данного типоразмера после соответствующей их регулировки погрешность практически не зависит от значения измеряемой величины, т.е. является аддитивной, как бы постоянной на всем интервале

шкалы, то предел допускаемой основной погрешности нормируется абсолютной погрешностью, определяемой по формуле (11.3) и называется приведенной погрешностью. Если погрешность измерительных устройств данного типоразмера является мультипликативной и пропорционально изменяется значению измеряемой величины –

$$\Delta = \pm \frac{C}{100} \cdot X ,$$

то предел допускаемой основной погрешности удобно нормировать через относительную погрешность, определяемую по формуле (11.4), так как норма определяется одним числом /8/

$$\delta = \pm \frac{100 \cdot c}{100 \cdot X} \cdot X = \pm c , \quad (11.4)$$

Значение предела относительной или приведенной погрешности определяется из ряда предпочтительных чисел вычисляется по формуле (11.5) /8/

$$[1; 1,5 (1,6); 2; 2,5 (3); 4; 5; 6] \cdot 10^n , \quad (11.5)$$

Числа 1,6 и 3 допускаются к применению, но не рекомендуются. Значение «n» принимается равным: +1, 0, -1, -2, и т.д. Причем при одном значении «n» допускается устанавливать не более пяти различных пределов допускаемой погрешности для измерительных устройств конкретного вида.

При нормировании основной погрешности учитывается тот факт, что положение реальной функции преобразования в пределах полосы, определяемой пределом допускаемой основной погрешности, изменяется, смотри на рисунке 11.1 а), за счет действия влияющих величин, что вызывает случайную погрешность, определяемую размахом R. Обычно допускаемое значение размаха принимается меньше половины предела допускаемой погрешности /8/

$$R \leq 0,5 \cdot \Delta, \quad (11.6)$$

Для нормирования вариации измерительных устройств используют формулы (11.3), (11.4), (11.5) или (11.6), т.е. выражают ее абсолютным или приведенным значением. Значение же предела допускаемой вариации принимается в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой основной погрешности обычно из следующих соотношений (11.7), (11.8)

$$\nu_y = (1,0 \div 1,5) \cdot \Delta , \quad (10.7)$$

$$W_y = (1,0 \div 1,5) \cdot \gamma, \quad (10.8)$$

Так как значение вариации всегда меньше удвоенного значения основной погрешности, то для некоторых измерительных устройств вариация не нормируется. Дополнительная погрешность нормируется в тех случаях, когда при измерении влияющих величин в рабочей области основная погрешность превышает установленный для нее предел. Дополнительная погрешность нормируется:

- в виде постоянного значения $\Delta_{\text{доп}}$ для всей рабочей области влияющей величины или по отдельным интервалам этой области;
- путем указания отношения предела допускаемой дополнительной погрешности, принятой для регламентируемого интервала влияющей величины, к значению этого интервала, т.е. $\Delta_{\text{доп}} / \Delta_e$ (Δ_e - регламентируемый интервал влияющих величин «е»);
- путем указания зависимости предела допускаемой погрешности от влияющей величины, т. е. $\Delta_{\text{доп}} = E(e)$.

Пределы допустимой дополнительной погрешности, как правило, устанавливают в виде долевого (кратного) значения предела допускаемой основной погрешности. Измерительные устройства принято разделять на классы точности. В настоящее время **класс точности «Λ»** трактуется как обобщенная характеристика средств измерений. Класс точности определяется пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностями средств измерений, а также рядом других свойств СИ, влияющих на точность осуществляемых с их помощью измерений. Связь между пределами основной и дополнительной погрешностей, а также с другими свойствами средств измерений обычно регламентируются соответствующими стандартами на отдельные виды средств измерений. Классы точности не устанавливаются только для тех средств измерений, для которых отдельно нормируется систематическая и случайная составляющие погрешности, а также для средств измерений, для которых нормируется и имеет существенное значение динамическая погрешность. Обозначение классов точности «Λ» производится в зависимости от способов задания пределов допускаемой основной погрешности. Если предел допускаемой основной погрешности выражается приведенной (выражение 10.9) или относительной погрешностями (выражение 10.8), то применяются соответственно следующие обозначения: 1,5 и (обозначения приведены для класса точности 1,5). В рассмотренных (наиболее распространенных) случаях обозначение класса точности дает информацию о пределе допускаемой основной погрешности. Числовые значения для классов точности выбирают из приведенного ряда (выражение 10.5). Для измерительных приборов и преобразователей, применяемых для технологических измерений, как правило, нормальные условия эксплуатации выбирают такими, чтобы в большинстве случаев исключалась необходимость нормирования дополнительной погрешности. Поэтому класс точности однозначно определяет точность этих средств измерений.

Чтобы отличить относительную погрешность от приведенной, обозначение класса точности в виде относительной погрешности обводят кружком (1).

Если погрешность нормирована в процентах от шкалы, то под обозначением класса точности ставится знак $\%$. Если погрешность нормирована сложной формулой (10.2), то класс точности обозначается как c/d (например 0,02/0,01).

11.1 Структурные схемы и метрологические характеристики измерительных систем

Для измерительных систем можно выделять некоторые общие структурные схемы. На рисунке 11.1 и 11.2 показаны структурные схемы измерительных систем, используемых для автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами. Измерительная система, построенная по схеме на рисунке 11.1, обеспечивает одновременное измерение и регистрацию всех величин объекта измерения, а измерительная система, построенная по схеме на рисунке 11.2, -поочередно измерение и регистрацию.

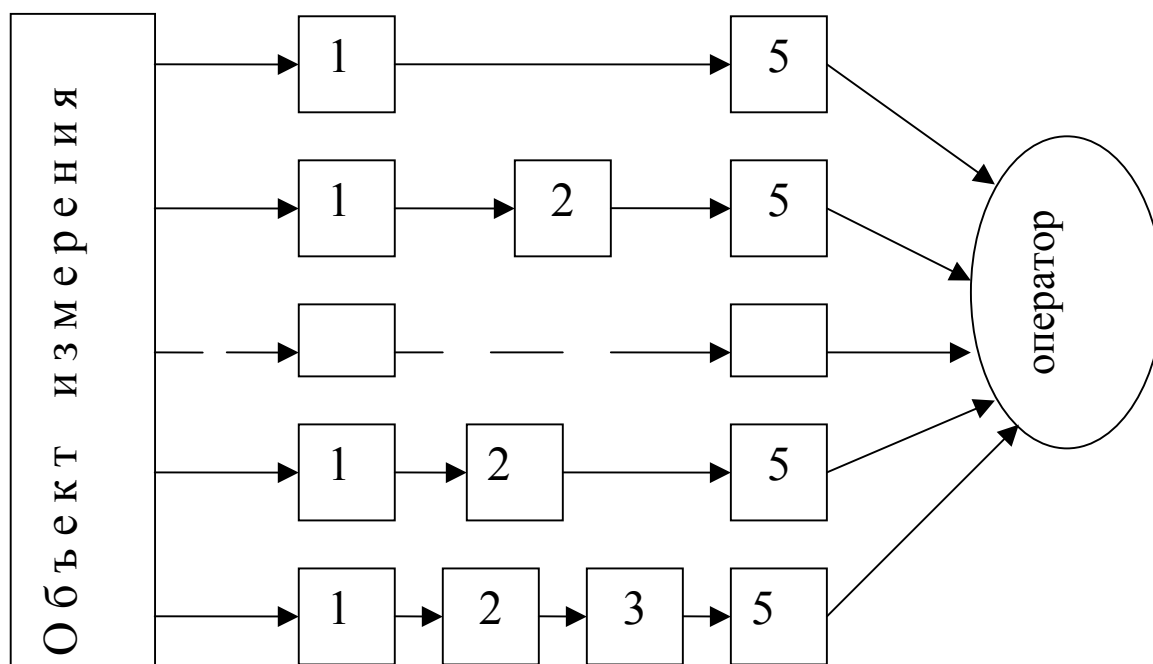


Рисунок 11.1 – Структурная схема для автоматического контроля и регулирования при управлении технологическими процессами.

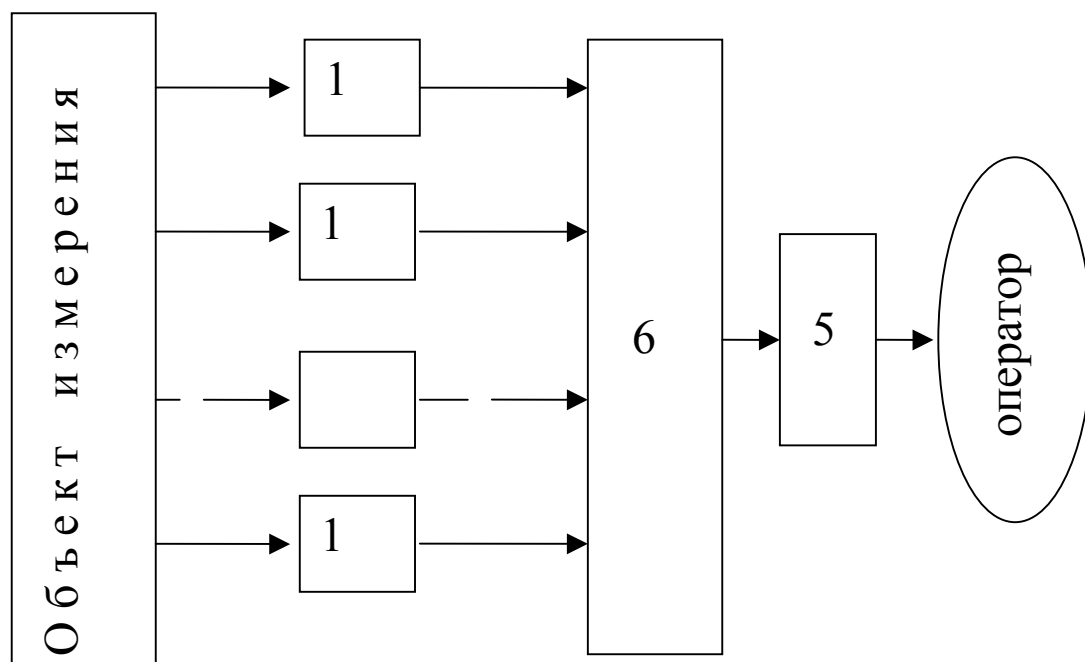


Рисунок 11.2 - Структурная схема для автоматического контроля и регулирования при управлении технологическими процессами.

Измерительная информация в приведенных измерительных системах формируется с помощью первичных измерительных преобразователей 1 и посылается в виде сигналов в канал связи 4. В измерительной системе рисунок – 11.1, в зависимости от типа измеряемой физической величины, принципа действия первичного измерительного преобразователя и расстояния, на которое необходимо передать информацию, в состав измерительной системы могут быть включены помимо первичных измерительных преобразователей промежуточный измерительный преобразователь 2 и 3 - измерительные преобразователи. При этом измерительный преобразователь может располагаться территориально около первичного прибора или около прибора 5, измеряющего сигнал, поступающий из канала связи, представляющего последний в форме, удобной для восприятия человеком, и осуществляющего регистрацию. Измерительный прибор 5 называют **вторичным** прибором, считая при этом, что все измерительные преобразователи, работающие с ним в комплекте, являются первичными приборами. В измерительной системе - рисунок 11.2 с поочередным подключением первичных измерительных преобразователей к прибору 5 применяется коммутатор 6, который следует рассматривать как вспомогательное устройство. Для простоты на рисунке 11.2 показана измерительная система, в составе которой имеется только первичные измерительные преобразователи - блоки 1. В общем случае в нее могут быть включены промежуточные и передающие измерительные преобразователи. При этом выходные сигналы преобразователей всех измеряемых величин в отличие от системы, построенной по схеме рисунку 11.1, должны быть одинаковыми по природе и диапазону измерений. Последнее условие необходимо для

обеспечения возможности их измерения и регистрации одним и тем же прибором 5. В структурных схемах рассмотренных измерительных систем можно выделить цепочки, состоящие из измерительных преобразователей, каналов связи и вторичных приборов. Если для каналов связи нормированы те же характеристики, что и для измерительных преобразователей и приборов измерительной системы, то можно рассматривать последнюю цепочку как последовательное соединение нескольких преобразователей.

Функция преобразования измерительной системы через известные функции преобразования отдельных преобразователей может быть в общем случае записана в виде формулы (11.9) /8/

$$Y = f_n \langle \dots f_3 \{ f_2 [f_1 (X)] \} \rangle \quad (11.9)$$

Если функции преобразования указанных преобразователей линейны, функция преобразования измерительной системы имеет вид (10.10) /8/

$$Y = \left(\prod_{i=1}^n K_i \right) \cdot X \quad (11.10)$$

где K_i - коэффициент преобразования i - го преобразователя.

Динамические свойства измерительной системы определяются динамическими свойствами входящих в ее состав преобразователей. С позиций теории автоматического регулирования измерительную систему можно рассматривать как последовательное соединение ряда динамических звеньев. Поэтому ее передаточную функцию можно представить произведением передаточных функций преобразователей в виде формулы (11.11)

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) \quad (11.11)$$

Для измерительных систем обычно нормируются те же метрологические характеристики, что и для измерительных устройств. В то же время следует подчеркнуть, что до сих пор не найдено теоретически обоснованное и практически целесообразное решение задачи нормирования метрологических характеристик измерительных систем.

При выполнении технологических измерений имеется лишь информация о метрологических характеристиках измерительных устройств, входящих в измерительную систему. Обычно эта информация представляется в виде класса точности, что для измерительных устройств, используемых для технологических измерений, соответствует пределу допускаемой приведенной погрешности. Поэтому для приближенной оценки приведенной погрешности

измерительной системы из «n» включенных последовательно преобразователей с линейными функциями преобразования используют выражение (11.12) /8/

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i, \quad (11.12)$$

где γ_i приведенная погрешность i -го преобразователя

Предполагается одновременное появление максимальных погрешностей одного знака при любых значениях измерений физической величины у всех измерительных преобразователей, составляющих конкретную измерительную систему. Для получения более реальной погрешности измерительных систем суммирование приведенных погрешностей преобразователей осуществляется вероятностным методом, т.е. используют выражение типа

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\lambda}{T(V_n - V_g)},$$

Оценка погрешности измерительных систем, полученная с помощью выражения (11.12), является максимальной, тогда получаем выражение (11.13) /8/

$$\gamma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \gamma_i^2}, \quad (11.13)$$

При этом предполагается, что погрешности всех преобразователей независимы, закон распределения погрешностей для каждого из преобразователей является равномерным, а значение предела допускаемой приведенной погрешности определяют границы этого распределения. Если функции преобразования измерительных устройств, входящих в измерительную систему, не линейны, то для оценки ее приведенной погрешности используют выражение (11.14) /8/

$$\gamma = \sqrt{\sum_{i=1}^n W_i^2 \cdot \gamma_i^2}, \quad (11.14)$$

где W_i - коэффициент влияния для i -го преобразователя.

Определение коэффициентов влияния W_i осуществляется так же, как и при обработке результатов косвенных измерений, которые мы с Вами уже рассматривали.

11.2 Надежность средств измерений

Использование для технологических измерений все более сложных измерительных приборов, преобразователей и систем определяет необходимость количественной оценки надежности их функционирования.

В общем случае **надежность** - свойство изделия (в том числе и СИ) выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки на отказ в часах. (например, студент - если капризничает и не слушает лекцию, то, значит, является системой с наработкой на отказ не более одного часа). Применительно к средствам измерения такими показателями являются нормируемые метрологические характеристики.

Под наработкой на отказ для средств измерений понимают продолжительность безотказной работы.

Количественными оценками надежности обычно служит вероятность безотказной работы средств измерений и интенсивность потока отказов для времени, в течение которого обеспечивается заданная вероятность безотказной работы.

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что в определенных условиях в пределах заданной продолжительности работы отказов не возникает.

Вероятность безотказной работы $P(\tau)$ средств измерений является экспоненциальной функцией времени « τ » работы и может быть представлена в виде (11.15) /8/

$$P(\tau) = \exp \left[- \int \lambda(\tau) \cdot d\tau \right], \quad (11.15)$$

где $\lambda(\tau)$ - интенсивность (параметр потока отказов, определяемая отношением частоты отказов к вероятности безотказной работы.) Подробнее вопросы надежности смотри в разделе испытания.

12 Метрологическое обеспечение измерений

Общие сведения. Под метрологическим обеспечением понимают установление и применение научных организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и точности измерений.

Понятие «метрологическое обеспечение» неразрывно связано с понятиями и нормами вытекающими из закона Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» и «метрологическая служба» различных уровней, от государственного – Государственный Комитет по стандартам Российской Федерации, до службы Главного метролога предприятия и его измерительных лабораторий. Научно-правовой основой метрологического обеспечения является Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ), представляющая собой комплекс государственных стандартов и других нормативно-технических документов (НТД). Единство - единообразие измерений. Под единообразием средств измерений понимают такое состояние измерений, когда они проградуированы в указанных единицах, а их метрологические свойства соответствуют нормам. Единообразие СИ обеспечивается путем их поверки и калибровки.

13 Применение вычислительной техники в средствах измерений /12/

Усложнение современного производства, развитие научных исследований привело к необходимости измерять и контролировать одновременно сотни и тысячи различных величин. Естественная физиологическая ограниченность возможностей человека в восприятии и обработке больших объемов информации стала одной из причин появления таких СИ, как измерительные системы. Измерительные системы – это совокупность функционально объединенных средств измерений, средств вычислительной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту, в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления. Примерами могут служить системы, развернутые на крупных предприятиях и предназначенные для контроля технологического процесса производства какого-либо изделия, например производство стали, электроэнергии и т.п.

В зависимости от назначения измерительные системы разделяют на измерительные, контролирующие, управляющие. По числу измерительных каналов системы подразделяются на одно-, двух-, трех- и многоканальные.

Важной их разновидностью являются информационно-измерительные системы (ИИС), предназначенные для представления измерительной информации в виде, необходимом потребителю. По организации алгоритма функционирования различают системы:

- с заранее заданным алгоритмом работы, правила функционирования которых не меняются, поэтому они могут использоваться только для исследования объектов, работающих в постоянном режиме;
- программируемые, алгоритм работы которых меняется по заданной программе, составляемой в соответствии с условиями функционирования объекта исследования;
- адаптивные, алгоритм работы которых, а в ряде случаев и структура, изменяются, приспособляясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта.

Наиболее перспективным методом разработки и производства ИИС является метод агрегатно-модульного построения из сравнительно ограниченного набора унифицированных, конструктивно законченных узлов или блоков. При построении агрегатированных систем должны быть решены задачи совместимости и сопряжения блоков как между собой, так и с внешними устройствами. Применительно к ИИС существует пять видов совместимости:

- информационная, которая предусматривает согласованность входных и выходных сигналов по видам и номенклатуре, информативным параметрам и уровням;

- конструктивная, обеспечиваемая согласованностью эстетических требований, конструктивных параметров, механических сопряжений блоков при их совместном использовании;
- энергетическая, предполагающая согласованность напряжений и токов, питающих блоки;
- метрологическая, обеспечивающая сопоставимость результатов измерений, рациональный выбор и нормирование метрологических характеристик блоков, а также согласование параметров входных и выходных цепей;
- эксплуатационная, т.е. согласованность характеристик блоков по надежности и стабильности, а также характеристик, определяющих влияние внешних факторов.

Связь между блоками системы и их совместимость устанавливается посредством стандартных интерфейсов. Под интерфейсом понимается совокупность механических, электрических и программных средств, позволяющих объединить блоки в единую систему.

Структура ИИС довольно разнообразна и существенно зависит от решаемых задач. Детально вопросы проектирования таких систем рассмотрены.

Важной разновидностью ИИС является измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) – функционально объединенная совокупность средств измерений, компьютеров и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения конкретной измерительной задачи. Основными признаками принадлежности средства измерений к ИВК являются: наличие процесса или компьютера; программное управление средствами измерений; наличие нормированных метрологических характеристик; блочно-модульная структура, состоящая из технической (аппаратной) и программной (алгоритмической) подсистем.

Техническая подсистема должна содержать СИ электрических величин (измерительные компоненты), средства вычислительной техники (вычислительные компоненты), меры текущего времени и интервалов времени, средства ввода-вывода цифровых и аналоговых сигналов с нормированными метрологическими характеристиками.

В программную подсистему ИВК входят системное и общее прикладное программное обеспечение (ПО), в совокупности образующие математическое обеспечение ИВК. Системное ПО представляет собой совокупность программного обеспечения компьютера, используемого в ИВК, и дополнительных программных средств, позволяющих работать в диалоговом режиме; управлять измерительными компонентами; обмениваться информацией внутри подсистем комплекса; проводить диагностику технического состояния. Программное обеспечение представляет собой взаимодополняющую, взаимодействующую совокупность подпрограмм, реализующих:

- типовые алгоритмы эффективного представления и обработки измерительной информации, планирования эксперимента и других измерительных процедур;

- архивирование данных измерений;
- метрологические функции ИВК (аттестация, поверка, экспериментальное определение метрологических характеристик и т.п.).

Большое значение имеет эффективное и наглядное построение экранных форм и управляющих элементов, называемых интерфейсом пользователя, обеспечивающих взаимодействие оператора с компьютером. Эффективность интерфейса заключается в быстром, на сколько это возможно, развитии у пользователей простой концептуальной модели взаимодействия с комплексом. Другими важными характеристиками интерфейса являются его конкретность и наглядность, что обеспечивается с помощью последовательно раскрываемых окон, раскрывающихся вложенных в меню и командных строк с указанием функциональных, «горячих» клавиш.

Измерительно-вычислительные комплексы предназначены для выполнения таких функций, как:

- осуществление прямых, косвенных, совместных или совокупных измерений физических величин;
- управление процессом измерений и воздействием на объект измерений;
- представление оператору результатов измерений в требуемом виде.

Для реализации этих функций ИВК должен обеспечивать:

- восприятие, преобразование и обработку электрических сигналов от первичных измерительных преобразователей;
- управление средствами измерений и другими техническими компонентами, входящими в состав ИВК;
- выработку нормированных сигналов, являющихся входными для средств воздействия на объект;
- оценку метрологических характеристик и представление результатов измерений в установленной форме.

По назначению ИВК делятся на типовые, проблемные и специализированные. Типовые комплексы предназначены для решения широкого круга типовых задач автоматизации измерений, испытаний или исследований независимо от области применения. Проблемные комплексы разрабатываются для решения специфичной для конкретной области применения задачи автоматизации измерений. Специализированные ИВК предназначены для решения уникальных задач автоматизации измерений, для которых разработка типовых и специализированных комплексов экономически нецелесообразна.

Основными составными частями комплекса являются:

- компьютер с периферийными устройствами, подключенными к нему, в том числе и посредством компьютерной сети;
- программное обеспечение, представляющее собой совокупность взаимосвязанных программ, написанных на алгоритмических языках разного уровня;

- интерфейс, организующий связь технических устройств ИВК с компьютером;
- испытательных сигналов, которыми воздействуют на объект измерения с целью получения измерительных сигналов. Каждый такой сигнал вырабатывается с помощью последовательно соединенных ЦАП_i и преобразователя «напряжение – испытательный сигнал» (ПНИС_i);
- измерительные каналы (ИК), предназначенные для преобразования в цифровой код заданного числа сигналов (K – для первого ИК и L – для N-го ИК). Структура ИК существенно зависит от решаемой задачи. Однако практически в любом случае каждый из них содержит аналоговый измерительный (АИП) и аналого-цифровой (АЦП) преобразователи. При обработке нескольких измерительных сигналов одним АЦП в состав комплекса включается коммутатор, предназначенный для поочередного подключения сигналов к входу АЦП. Коммутатор может включаться как после АИП, так и перед ним.

АИП предназначен для преобразования измерительного сигнала в сигнал, однородный с входным сигналом АЦП (т.е. в напряжение), и масштабирования (усиления или ослабления) его до уровня, необходимого для проведения операции аналого-цифрового преобразования с минимальной погрешностью. При наличии нескольких измерительных сигналов АИП состоит из K независимых последовательно соединительных первичных преобразователей и управляемых компьютером масштабируемых усилителей. Если же измерительные сигналы являются однородными физическими величинами и могут быть поочередно выбраны (с коммутированы), то в ИК целесообразно использовать только один АИП. Он последовательно во времени проводит преобразование измерительного сигнала и последующее его масштабирование. АИП преобразует сигнал в цифровой код и передает его через интерфейс в компьютер. Работой всей аппаратной части ИВК управляет компьютер. Это осуществляется посредством:

- подачи управляющих сигналов различного рода;
- считывания и передачи по требуемым адресам цифровой информации.

По команде оператора выбирается тот или иной режим работы ИВК из числа реализованных в программном обеспечении. Компьютер рассчитывает цифровой код, описывающий заданное изменение во времени каждого из M испытательных сигналов, и в виде двоичного цифрового кода записывает в оперативные запоминающие устройства формирователя испытательных сигналов. Оттуда эти коды последовательно во времени циклически поступают на вход каждого из ЦАП. Формируемые на их выходах напряжения с помощью ПНИС преобразуются в требуемые физические величины, воздействующие на объект измерения.

Измерительные сигналы, представляющие собой отклик объекта измерения на испытательные воздействия, преобразуются в измерительных

каналах в двоичный цифровой код и считываются компьютером. Полученные коды обрабатываются по заданным алгоритмам, в результате получается искомая измерительная информация. Каждый ИВК – это сложное техническое устройство, поэтому содержит средства диагностики его состояния. Измерительно-вычислительные комплексы рассмотрены.

14 Применение средств измерений /8, 11, 14, 16/

14.1 Измерение геометрических величин

14.1.1 Линейно-угловые измерения

Вопрос повышения качества продукции имеет первостепенное значение.

Известно, что «на повышение качества продукции должны быть нацелены весь механизм планирования и управления, вся система материального и морального поощрения, усилия инженеров и конструкторов, мастерство рабочих любым, малым или большим, субъектом хозяйственной деятельности РФ».

Основным показателем, определяющим квалификацию рабочего и качество профессионального обучения, наряду со сложностью производимых работ и производительностью труда является качество изготавливаемой продукции. Одним из необходимых условий изготовления высококачественной продукции является умение ее контролировать, для чего необходимо владеть техникой измерения.

В первой части этой главы содержатся наиболее простые средства измерений, применяемые в начале производственного обучения: измерительные металлические линейки, угольники и т. п. В последующих частях даются измерительные инструменты и приборы, обеспечивающие более высокую точность, сгруппированные по их конструктивным особенностям и назначению с учетом последовательности их использования в производственном обучении. Наиболее полно (по элементам) дан материал по применению наиболее широко используемых средств измерений: штангенциркулям, микрометрам, угломерам и т. д.

Эту главу можно использовать для работы студентов в лабораторной аудитории, при выполнении заданий на лабораторно-практических занятиях, в процессе производственного обучения, а также для экранизации занятий с помощью эпидиаскопа и других технических средств.

Измерительные металлические линейки (ГОСТ 427—75*)

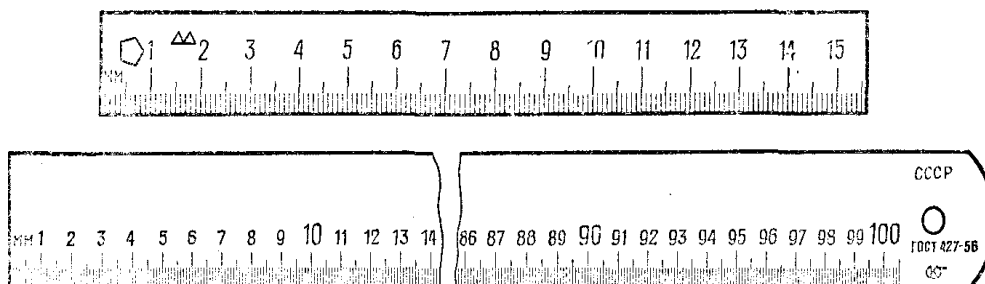


Рисунок 14.1 - Измерительные металлические линейки

Измерительные металлические линейки предназначены для непосредственных измерений длин. Верхний предел измерения линейек от 150 до 1000 мм. Цена деления 1 мм. Линейки могут иметь один рабочий торец и два рабочих торца, одну или две шкалы.

Измерение линейкой

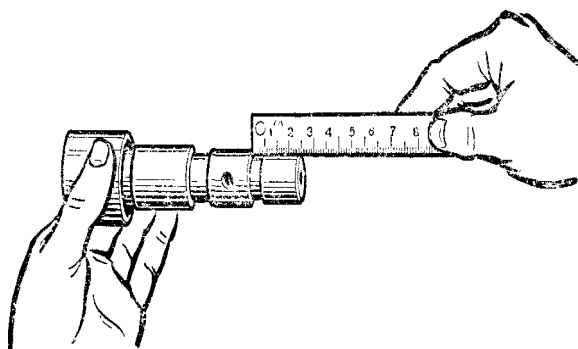
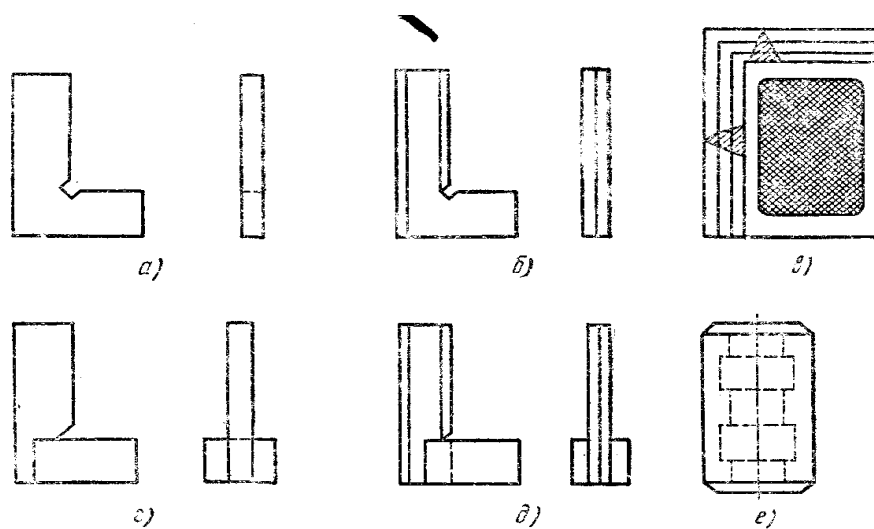


Рисунок 14.2 - Линейка прикладывается к образующей цилиндра без перекосов

Угольники

Угольник с углом 90° предназначены для разметки и контроля прямых углов деталей, а также для проверки взаимной перпендикулярности отдельных поверхностей деталей, при монтаже оборудования и для проверки инструментов, приборов и при обработке деталей на станках, а также при наладке станков.



a — плоский, *б* — плоский лекальный, *в* — цельный лекальный, *г* — с широким основанием., *д* — лекальный с широким основанием, *е* - цилиндрический.

Рисунок 14.3 - Типы угольников

Перед применением угольник рекомендуется проверить сравнением с более точным угольником «на просвет»

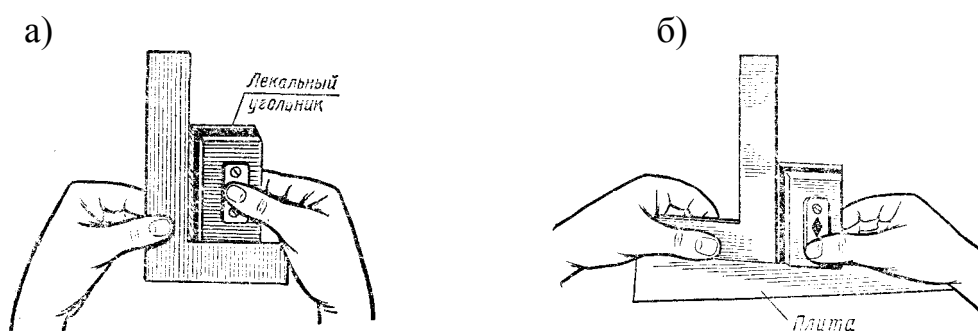


Рисунок 14.4 - Проверка внутреннего и наружного угла

Применение угольников

Проверка наружного и внутреннего углов

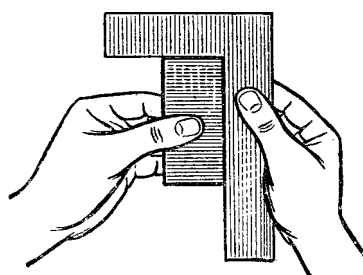


Рисунок 14.5 - Рабочие грани угольника должны прилегать полностью к проверяемым поверхностям

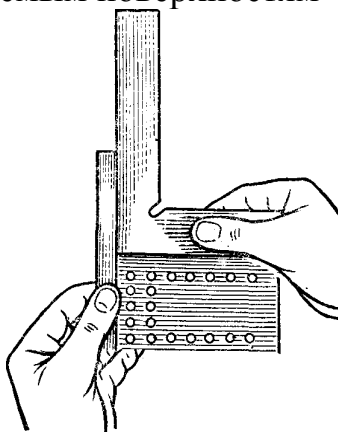


Рисунок 14.5, лист 2

Образцы шероховатости поверхности

Образцы шероховатости поверхности предназначены для определения класса шероховатости поверхностей деталей. Классы шероховатости поверхности детали определяют визуально (зрительно) методом непосредственного сравнения с образцами. Для оценки высоких классов (8—13) следует применять лупу. Для правильной оценки необходимо применять образцы, по характеру обработки и материалу соответствующие проверяемым поверхностям деталей (изделий).

Выпуск образцов для определения классов шероховатости прекращен в связи с заменой ГОСТ 2789—59, где они были предусмотрены, на ГОСТ 2789—73*, в котором они отсутствуют.

ГОСТ 2789—73* «Шероховатость поверхности», введенный с 1975 г., разрешал применение классов шероховатости поверхности до 1980 г. В связи с этим существовала справочная таблица соответствия классов шероховатости по ГОСТ 2789—59 значениям R_z и R_a по ГОСТ 2789—73*.

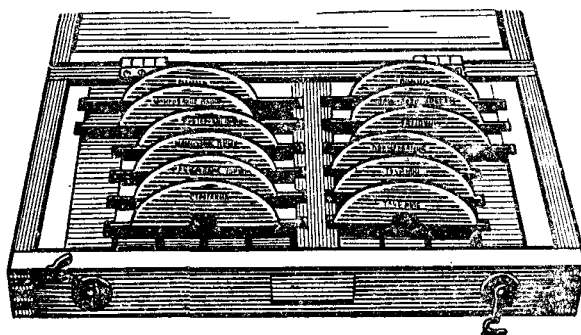


Рисунок 14.6 - Образцы шероховатости поверхностей

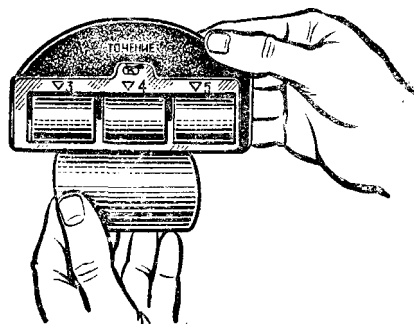
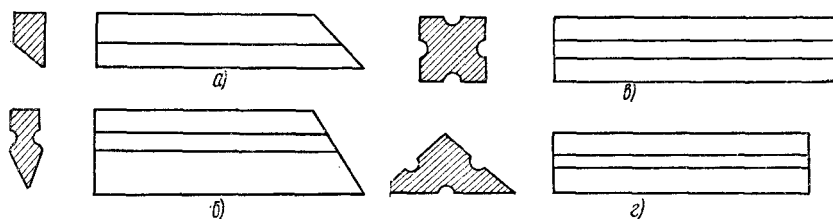


Рисунок 14.6, лист 2

ГОСТ 2789 – 73 «Шероховатость поверхности» действует в РФ и в настоящее время по состоянию на 01.09.2002 год. Вышеуказанная таблица приводится для иллюстрации старых источников обучения, в новых источниках действует ГОСТ 2.309 –73 «ЕСКД. Обозначение шероховатости поверхности», что соответствует, в принципе, тому же самому.

Лекальные линейки (ГОСТ 8026—92)

Лекальные линейки предназначены для контроля прямолинейности и плоскостности небольших поверхностей деталей методом световой щели.



a — с односторонним скосом, *б* — четырехгранные, *в* — с двусторонним скосом, *г* — четырехгранные

Рисунок 14.7 - Примеры лекальных линеек

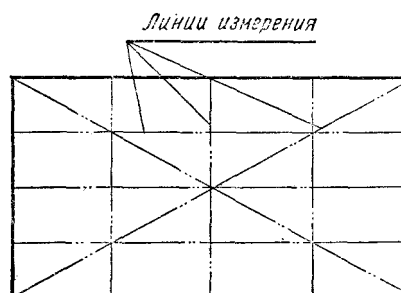
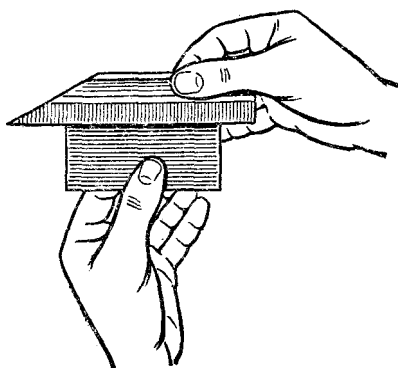


Рисунок 14.8 - Проверка прямолинейности, проверка плоскостности

Поверочные линейки с широкой рабочей поверхностью и плиты (ГОСТ 8026—92)

Поверочные линейки и плиты предназначены для контроля плоскостности и угла пересекающихся поверхностей (угловыми линейками) методом «на краску» и по величине линейных отклонений — определением величины зазоров.

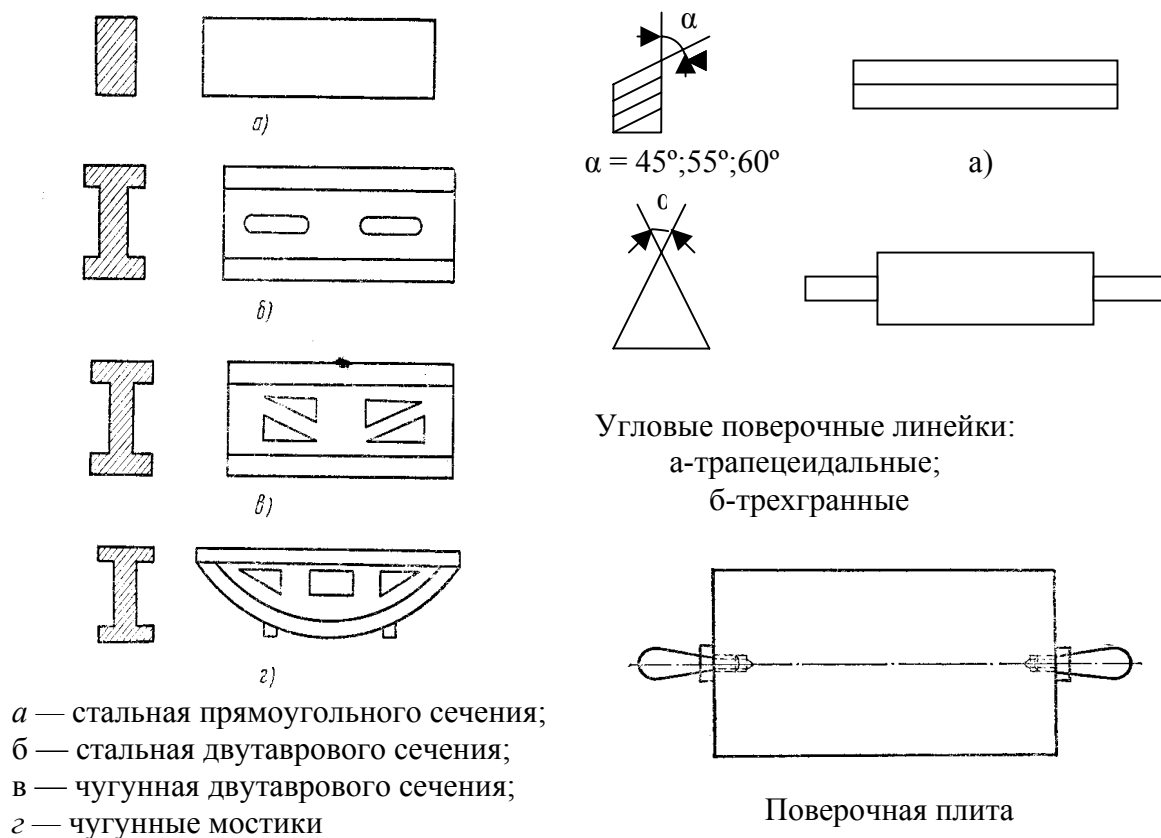


Рисунок 14.9 - Поверочные линейки

Контроль плоскостности методом «на краску»

У шабренных поверхностей плоскостность и угол пересекающихся поверхностей проверяют перемещением проверяемых поверхностей относительно рабочих сторон плит или угловых линеек, предварительно покрытых легким слоем красящего материала. Плоскостность характеризуется количеством пятен на проверяемой поверхности в квадрате со стороной 25 мм

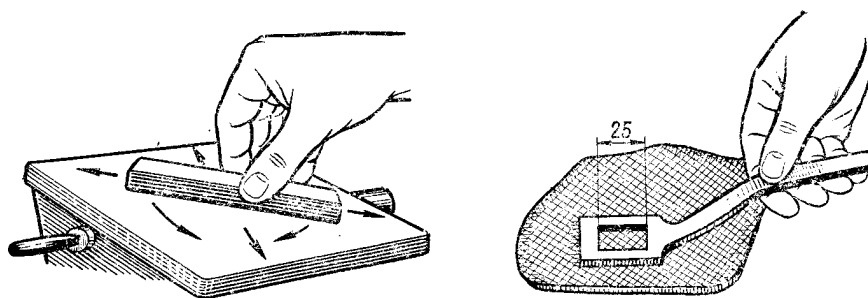


Рисунок 14.10 - Контроль плоскостности

Щупы

Щупы предназначены для определения величины зазора между двумя поверхностями контактным методом. Щуп представляет собой стальную с параллельными измерительными плоскостями пластинку определенной толщины. Щупы комплектуются в наборы, в которых пластины закрепляют в обойму в порядке возрастания их толщины. Существует четыре номера наборов, толщина щупов в которых ограничена диапазоном 0,02—1 мм.

Щупы длиной 100 мм имеют следующие номинальные размеры: набор № 1 (9 щупов)—0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1 мм; набор № 2 (17 щупов) —0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5 мм; набор № 3 (10 щупов) —0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1 мм; набор № 4 (10 щупов) —0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 мм.

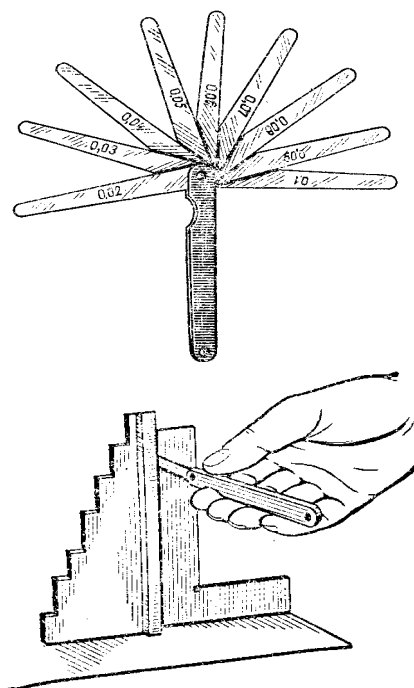


Рисунок 14.11 - Набор щупов в обойме, применение щупа при проверке перпендикулярности

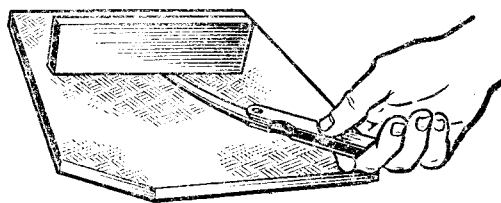


Рисунок 14.12 - Применение щупа

14.1.1.1 Штангенинструменты

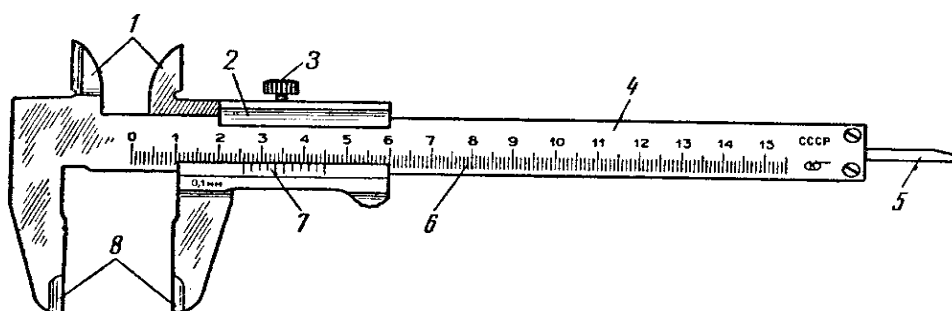
Для измерения линейных размеров в машиностроении широко применяют штангенинструменты. Метод измерения штангенинструментами прямой, абсолютный.

Штангенциркули (ГОСТ 166—89*)

Штангенциркуль ШЦ-1 с пределами измерений 0—125 мм и величиной отсчета по нониусу 0,1 мм

Предназначен для наружных и внутренних измерений и для измерения глубин. Штангенциркуль ШТЦ-1 отличается от ШЦ-1 тем, что губки для наружных измерений твердосплавные, а губки для внутренних измерений отсутствуют.

Характерной особенностью для штангенинструментов является наличие линейного нониуса (дополнительной шкалы) для отсчета целых и дробных величин цены деления штанги.



- 1 — губки для внутренних измерений, 2 — рамка, 3 — зажим рамки, 4—штанга, 5—линейка глубиномера, 6— шкала штанги, 7 — нониус, 8 — губки для наружных измерений

Рисунок 14.13 - Штангенциркуль ШЦ – 1

Целое число миллиметров у штангенинструментов отсчитывается по шкале штанги слева направо нулевым штрихом нониуса

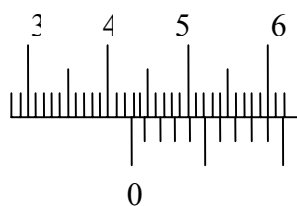


Рисунок 14.14 - Количество целых миллиметров равно 42

Нониус с величиной отсчета 0,1 мм

Нониус длиной 19 мм разделен на 10 частей. Одно деление нониуса составляет $\frac{19}{10} = 1,9 \text{ мм}$, что на 0,1 мм меньше целого числа миллиметров.

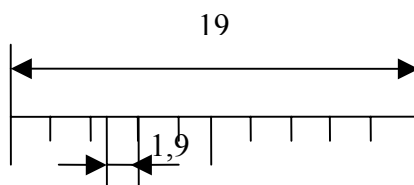


Рисунок 14.15 - Шкала нониуса

Положение шкалы штанги и нониуса с величиной отсчета 0,1 мм при нулевом показании

При нулевом показании штрих нониуса находится от ближайшего справа штриха штанги на расстоянии, равном величине отсчета (0,1 мм), умноженной на порядковый номер нониуса, не считая нулевого, т. е. при перемещении рамки до совпадения какого-либо штриха нониуса со штрихом штанги размер между губками штангенциркуля (дробная величина) будет равен величине отсчета (0,1 мм), умноженной на порядковый номер этого штриха нониуса.

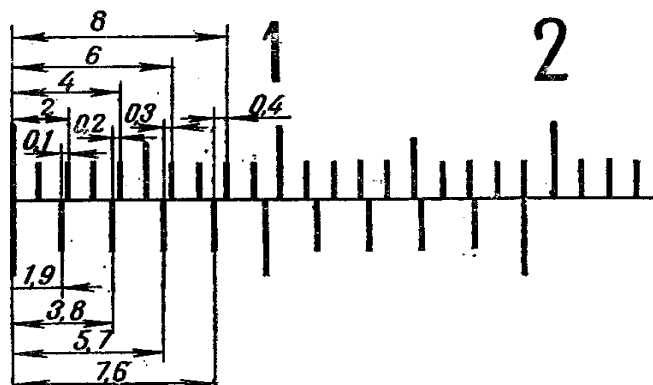
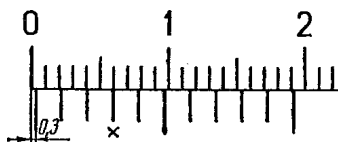


Рисунок 14.16 - Отсчет по нониусу

Определение доли миллиметра нониусом с величиной отсчета 0,1 мм

Дробная величина (0,3 мм) получена в результате умножения величины отсчета (0,1 мм) на порядковый номер штриха нониуса, т. е. третьего (не считая нулевого), совпадающего со штрихом штанги.



Крестиком указан 3-й штрих нониуса

Рисунок 14.17 - Отсчет по нониусу

Чтение показаний на штангенциркуле с величиной отсчета 0,1 мм

Целое число миллиметров отсчитывается по шкале штанги слева направо нулевым штрихом нониуса. Дробная величина (количество десятых долей миллиметра) определяется умножением величины отсчета (0,1 мм) на порядковый номер штриха нониуса (не считая нулевого), совпадающего со штрихом штанги.



пример отсчета:

39 мм + (+0,1) мм X 7 = 39,7 мм (слева),

61 мм + (+0,1) мм X 4 = 61,4 мм (справа).

Рисунок 14.18 - Пример отсчета

Проверка нулевого положения штангенциркуля

При отсутствии просвета между губками для наружных измерений или при небольшом просвете (до 0,15 мм) должны совпадать нулевые штрихи нониуса и штанги.

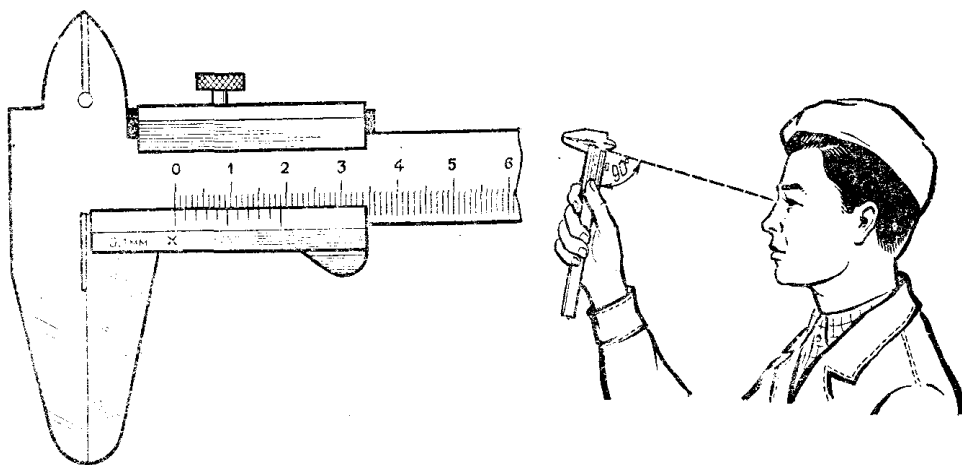


Рисунок 14.17 - Проверка на просвет

Последовательность измерения штангенциркулем

При измерении штангенциркулем измерительные поверхности губок доводят до требуемого размера путем соприкосновения с проверяемой поверхностью, проверяя при этом правильность их положения (отсутствие перекосов и нормальность усилия при перемещении), закрепляют рамку и читают показание.

Перемещение рамки

При перемещении рамки правая рука должна поддерживать штангу.

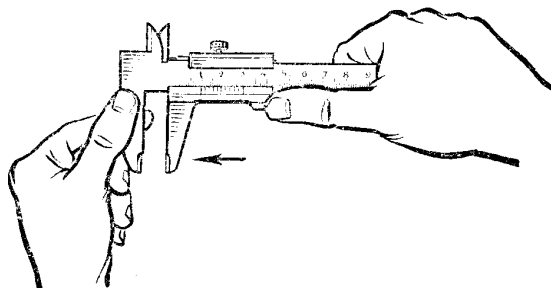


Рисунок 14.18 - Применение штангенциркуля при измерениях

Положение линейки глубиномера относительно проверяемой детали

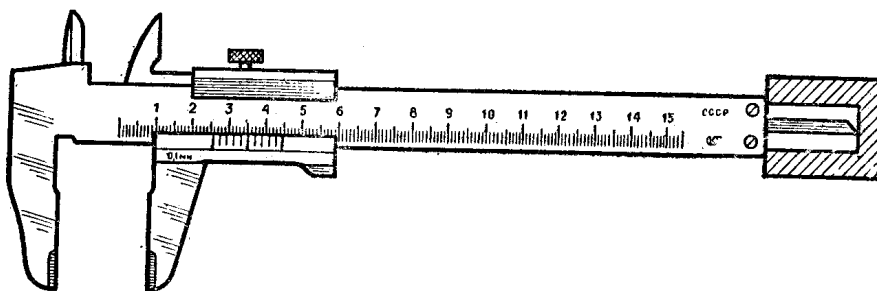


Рисунок 14.19 - Линейка глубиномера перпендикулярна поверхностям, между которыми проверяется глубина

Положение рук относительно штангенциркуля и незакрепленной детали

При измерении незакрепленной детали левая рука должна находиться за губками и захватывать деталь недалеко от губок; правой рукой поддерживают штангу, при этом большим пальцем этой руки перемещают рамку до соприкосновения с проверяемой поверхностью, не допуская перекоса губок и добиваясь нормального измерительного усилия.

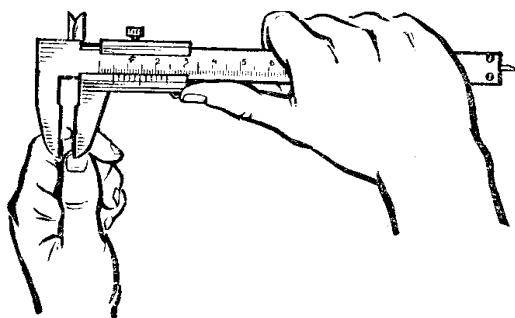


Рисунок 14.20- Положение рук относительно СИ и детали, незакрепленной в приспособлении

Закрепление рамки

Закрепление рамки надо производить большим и указательным пальцами правой руки, поддерживая штангу остальными пальцами этой руки; левая рука при этом должна поддерживать гайку фиксирующего винта штанги.

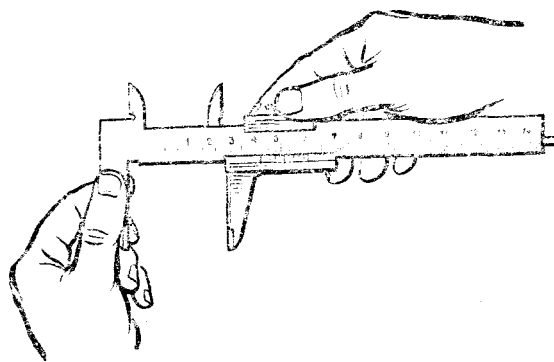


Рисунок 14.21 - Закрепление рамки фиксирующим винтом

Измерительное усилие

Нормальное измерительное усилие достигается легким контактированием при перемещении проверяемых поверхностей детали относительно измерительных поверхностей инструмента.

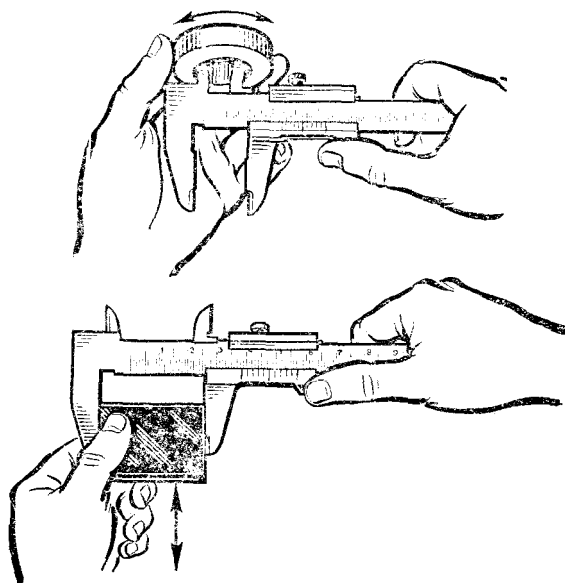


Рисунок 14.22 - Измерительное усилие

При чтении показаний штангенциркуль следует держать прямо перед глазами

Если смотреть на показания сбоку, это приведет к неправильным результатам измерений. Из этих же соображений (предотвращение искажения показаний) поверхность, на которой нанесена шкала нониуса, имеет скос для того, чтобы приблизить шкалу нониуса к основной шкале на штанге.

После окончания работы штангенинструмент надо протереть, смазать антикоррозионным составом, развести измерительные губки на 2—3 мм, ослабить зажимы рамки и инструмент положить в футляр.

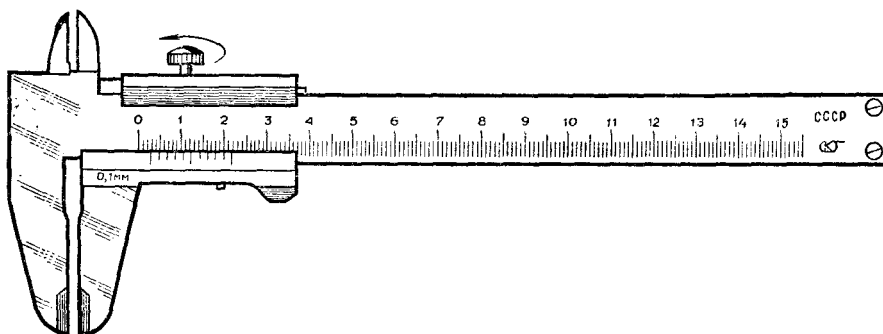
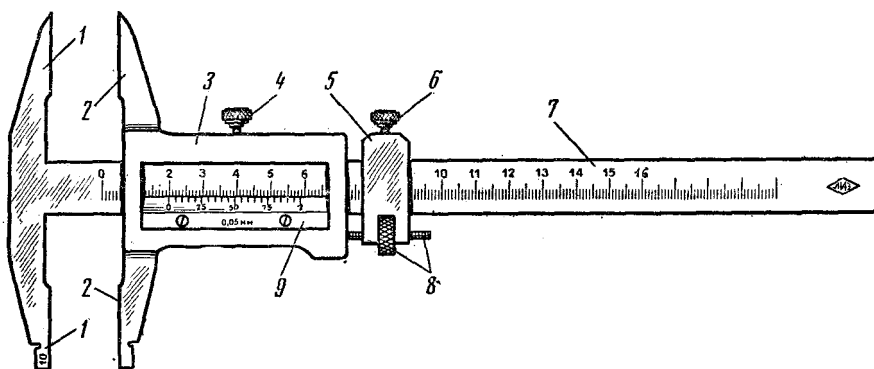


Рисунок 14.23 - Завершающие действия перед укладкой штангенциркуля в футляр хранения

Штангенциркуль ШЦ-11 с пределами измерений 0—160 мм и величиной отсчета по нониусу 0,05 мм

Предназначен для наружных и внутренних измерений и разметки.

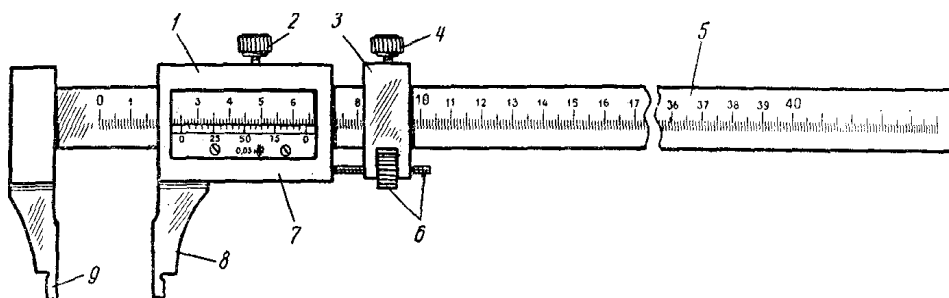


1 — неподвижные измерительные губки, 2 — подвижные измерительные губки, 3 — рамка, 4 — зажим рамки, 5 — рамка микрометрической подачи, 6 — зажим рамки микрометрической подачи, 7 — штанга, 8 — гайка и винт микрометрической подачи рамки, 2 — нониус

Рисунок 14.25 - Штангенциркуль ШЦ - 11

Штангенциркуль ШЦ-III с пределами измерений 0—400 мм и величиной отсчета по нониусу 0,05 мм

Предназначен для наружных и внутренних измерений.



1 — рамка, 2 — зажим рамки, 3 — рамка микрометрической подачи, 4 — зажим рамки микрометрической подачи, 5 — штанга, 6 — гайка и винт микрометрической подачи, 7 — нониус, 8 — губка рамки, 9 — губка штанги

Микрометрическую подачу применяют для точной установки рамки относительно штанги.

Рисунок 14.26 - Штангенциркуль ШЦ - 111

Нониус с величиной отсчета 0,05 мм

Нониус, длина которого равна 39 мм, разделен на 20 частей. Одно деление нониуса составляет

$$\frac{39}{20} = 1,95 \text{ мм}, \text{ на } 0,05 \text{ мм меньше целого числа миллиметров}$$

Положение шкалы штанги и нониуса с величиной отсчета 0,05 мм при нулевом показании

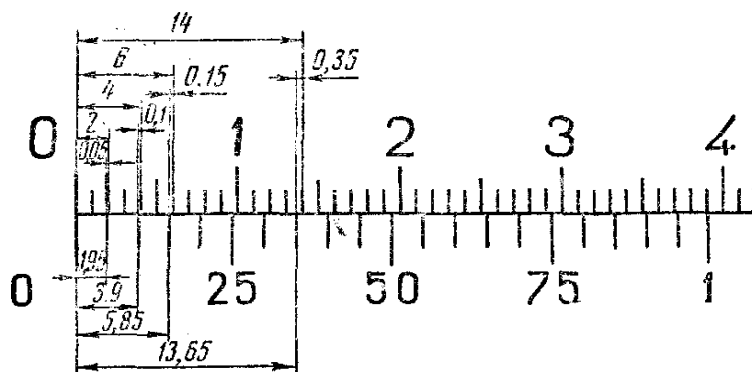


Рисунок 14.27 - Отсчет по нониусу с ценой деления 0,05 мм

При нулевом показании штрих нониуса находится от ближайшего справа штриха штанги на расстоянии, равном величине отсчета (0,05 мм), умноженной на порядковый номер штриха нониуса, не считая нулевого.

Определение доли миллиметра нониусом с величиной отсчета 0,05 мм

Дробная величина (0,35 мм) получена в результате умножения величины отсчета (0,05 мм) на порядковый номер штриха нониуса, т. е. седьмого (не считая нулевого), совпадающего со штрихом штанги $0,05 \text{ мм} \times 7 = 0,35 \text{ мм}$. Для ускорения отсчета используют цифры нониуса 25, 50 и т. д., обозначающие сотые доли миллиметра. Например, $0,25 \text{ мм} + (0,05 \text{ мм} \times 2) = 0,35 \text{ мм}$.

Чтение показаний на штангенинструментах с величиной отсчета 0,05 мм

При чтении показаний на штангенинструментах с величиной отсчета по нониусу 0,05 мм целое число миллиметров отсчитывают слева направо нулевым штрихом нониуса. Затем находят штрих нониуса, совпадающий со штрихом шкалы штанги. После этого к ближайшей ей слева цифре нониуса (25 или 50, или 75), обозначающей сотые доли миллиметра, прибавляют результат умножения величины отсчета на порядковый номер короткого штриха нониуса, совпадающего со штрихом штанги; считая его от найденного длинного оцифрованного штриха. Если же со штрихом штанги совпадает длинный оцифрованный штрих нониуса, то ограничиваются прибавлением его величины к целому числу миллиметров.

Примеры чтения показаний на штангенинструментах с величиной отсчета по нониусу 0,05 мм и 0,02 мм*

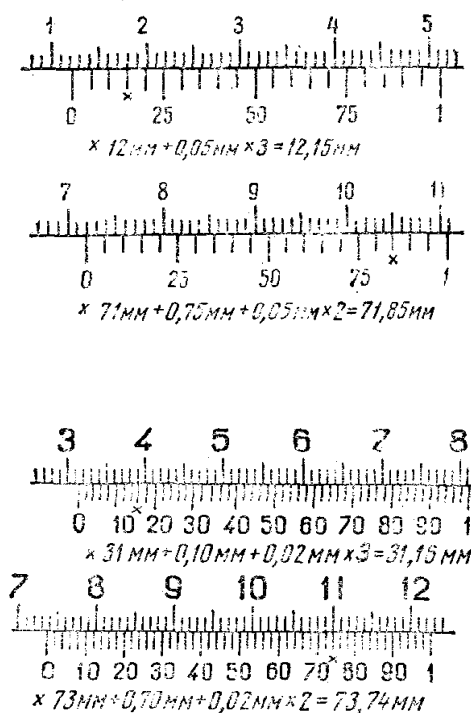


Рисунок 14.28 - Чтение показаний по нониусам

Выпуск штангенциркулей с величиной отсчета по нониусу 0,02 мм прекращен, но на производстве они еще используются.

Чтение показаний при внутренних измерениях

При внутренних измерениях к показаниям штангенциркуля прибавляется толщина губок, указанная на них. Для более точного контактирования с изделием губки штангенциркуля с наружной стороны имеют сферическую поверхность.

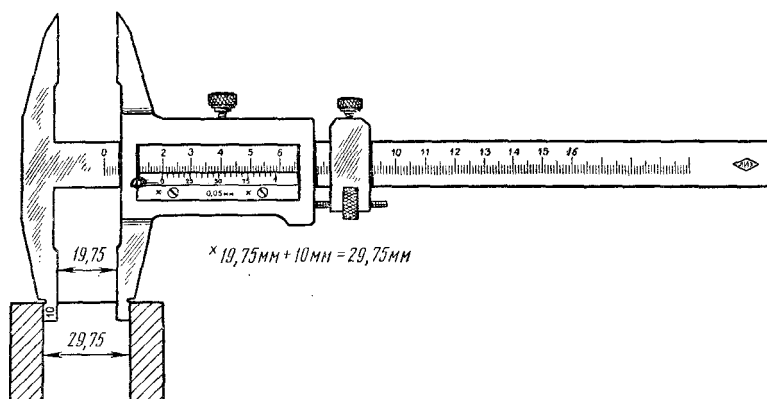


Рисунок 14.29 - Чтение показаний при внутренних измерениях

Штангенциркуль с двумя нониусами с пределами измерений 0—200 мм и 0—320 мм и величиной отсчета по нониусу 0,1 мм

Левый нониус предназначен для наружных измерений, а правый нониус — для внутренних измерений. Конструкция этого штангенциркуля исключает необходимость прибавления к показаниям инструмента толщины губок.

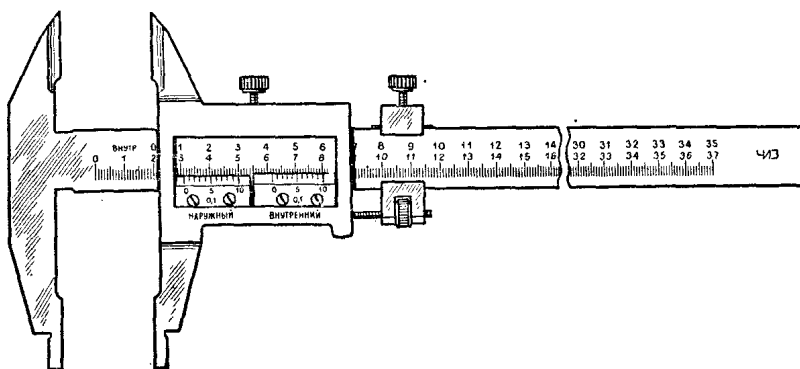


Рисунок 14.30- Штангенциркуль с двумя нониусами

Применение микрометрической подачи

Приблизительно устанавливают контролируемый размер (при наружном измерении несколько больше, а при внутреннем несколько меньше контролируемого размера), закрепляют рамку микрометрической подачи, затем

при помощи микрометрической пары доводят губки до соприкосновения с проверяемыми поверхностями, закрепляют рамку, не допуская перекоса и добиваясь нормального измерительного усилия.

Приблизительная установка размера

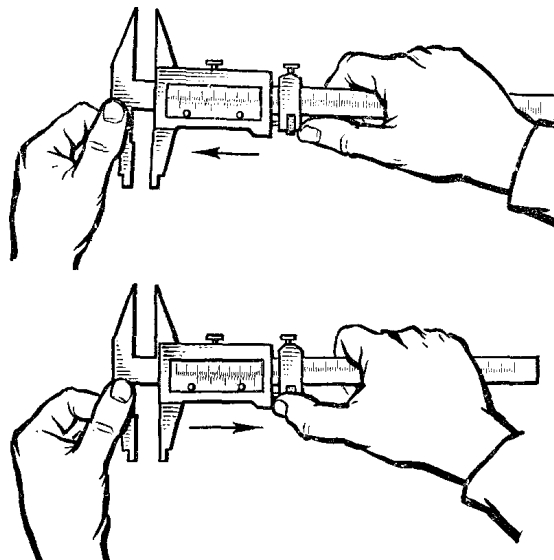


Рисунок 14.31 - Микрометрическая подача

Закрепление рамки микрометрической подачи

Зажим рамки микрометрической подачи производится большим и указательным пальцами правой руки при поддержке штанги ее остальными пальцами.

Вращение гайки микрометрической подачи

Большим и указательным пальцами правой руки вращают гайку микрометрической подачи, поддерживая штангу остальными пальцами правой руки; левой рукой поддерживают губку штанги.

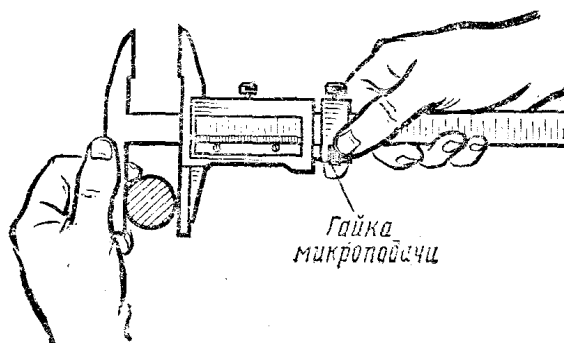


Рисунок 14.32 - Вращение гайки микрометрической подачи

Закрепление рамки

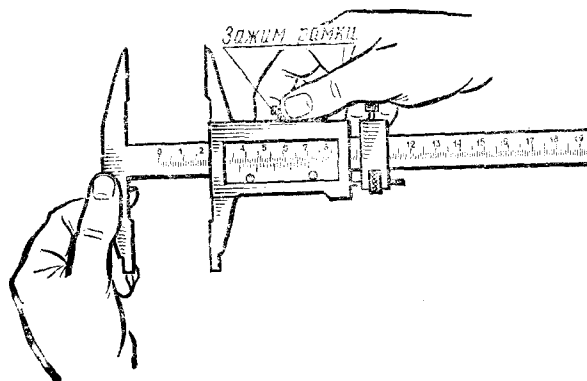


Рисунок 14.33 - Закрепление рамки

Проверка на ощущение измерительного усилия при измерении большого внутреннего диаметра

Надо приблизительно установить размер несколько меньше измеряемого, ввести губки штангенциркуля в проверяемую поверхность и слегка прижать к ней губку штанги. Затем с помощью микроподачи и одновременного кругового перемещения губки рамки в горизонтальной плоскости надо добиться легкого контактирования двумя губками. Для избежания перекоса при проверке измерительного усилия перемещения губок в вертикальной плоскости надо опираться на средние пальцы рук, установив их возле губок.

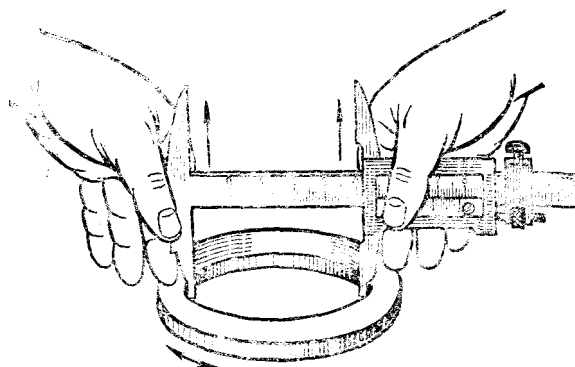


Рисунок 14.34 - Измерительное усилие

Штангенглубиномер с величиной отсчета по нониусу 0,05 мм и пределами измерений 0—250 мм (ГОСТ 162—90)*

Измерительная поверхность основания по площади значительно больше измерительной поверхности штанги, что обеспечивает устойчивость штангенглубиномера при измерении и возможность его применения при измерении глубин в отверстиях и пазах небольших размеров. Выпускается также с величиной отсчета 0,1 мм и пределами измерений до 500 мм.

Проверка нулевого положения штангенглубиномера

При соприкосновении измерительных поверхностей основания и штанги с плитой или лекальной линейкой нулевые штрихи нониуса и штанги должны совпадать.

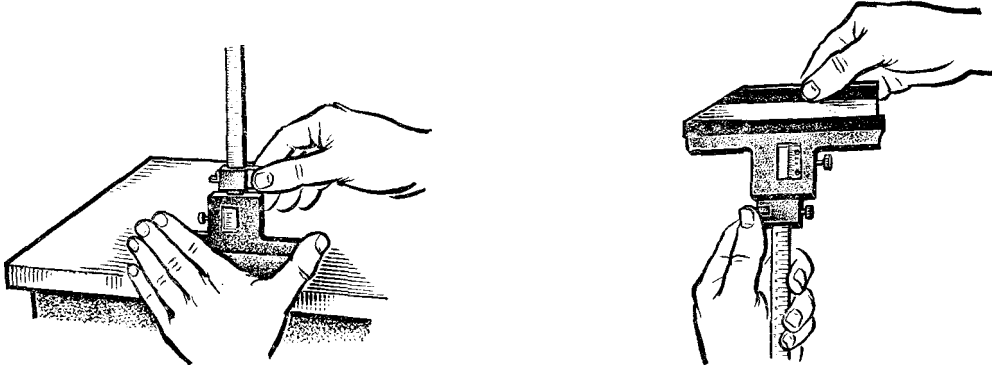
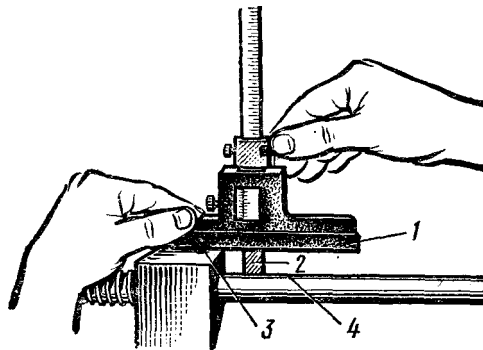


Рисунок 14.35 - Нуль штангенглубиномера

Применение штангенглубиномера

Левой рукой прижать основание 1 к поверхности 3, а правой рукой довести штангу 2 до соприкосновения с поверхностью 4.

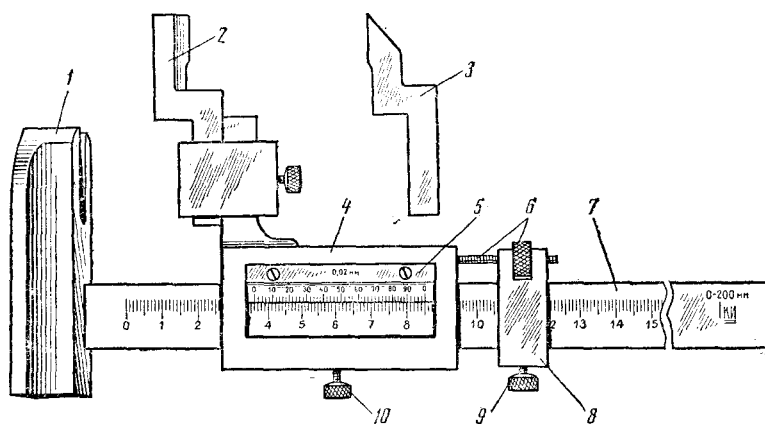


1 — основание, 2 — штанга, 3, 4 — поверхности детали

Рисунок 14.36 - Применение штангенглубиномера

Штангенрейсмас с величиной отсчета по нониусу 0,05 и 0,01 мм (ГОСТ 164—90)*

Предназначен для измерения высоты и разметочных работ.



1 — основание, 2 — измерительная ножка, 3 — разметочная ножка, 4 — рамка, 5 — нониус, 6 — винт и гайка микрометрической подачи, 7 — штанга, 8 — рамка микрометрической подачи, 9 — зажим рамки микрометрической подачи, 10 — зажим рамки.

Рисунок 14.37 -Штангенрейсмасс

Чтобы предупредить грубые ошибки при подготовке штангенрейсмаса к измерению, надо при сборке ножку установить в державке ниже губки рамки. Иначе (если ножка будет выше губки рамки) ошибка будет равна сумме толщин ножки и губки рамки.

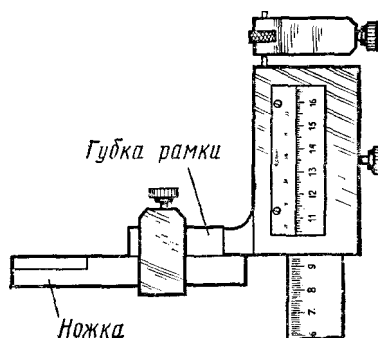
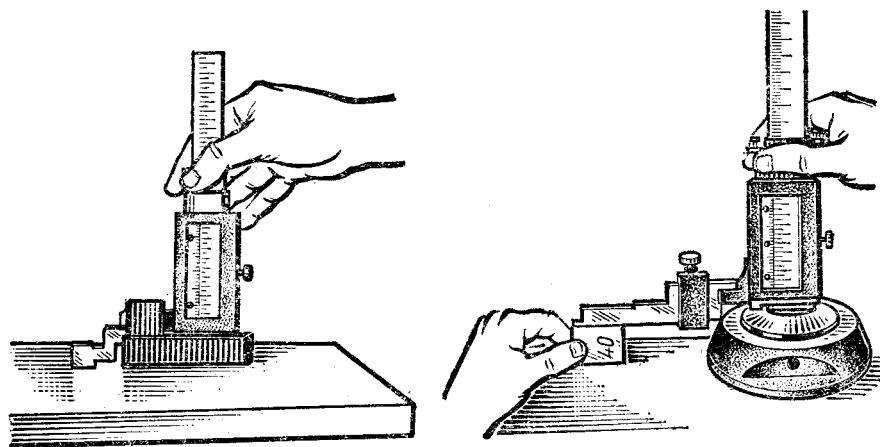


Рисунок 14.38 - Предупреждение ошибки в губках

Выпуск штангенрейсмасов с величиной отсчета по нониусу 0,02 мм прекращен, но на производстве они еще используются.

Проверка нулевого положения штангенрейсмаса

При отсутствии зазора между ножкой и плитой (или концевой мерой, равной нижнему пределу измерения) нулевые штрихи нониуса и штанги должны совпадать.



Пределы измерения 0—250 мм

Пределы измерения 40—400 мм

Рисунок 14.39 - Проверка нулевого положения измерительной губки

Применение штангенрейсмаса

При измерении высоты левой рукой прижимают основание к плите, а правой рукой при помощи микроподачи доводят измерительную ножку до соприкосновения с поверхностью детали.

При разметке после установки размера правой рукой, слегка прижимая основание к плите, перемещают штангенрейсмас относительно детали.

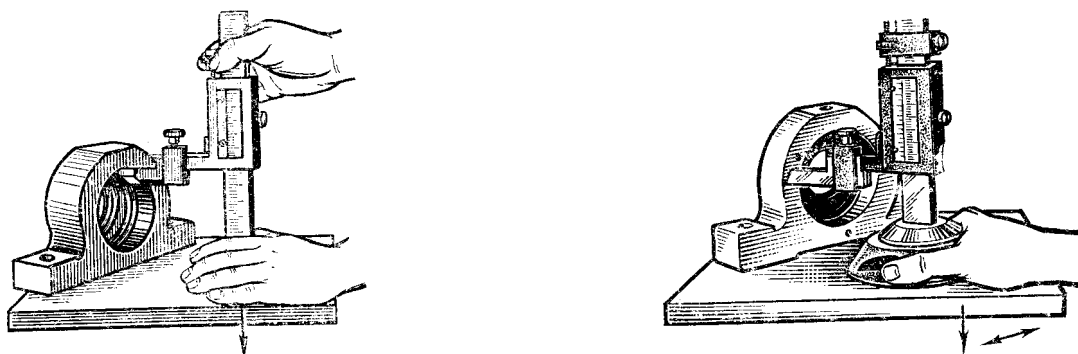


Рисунок 14.40 - Применение штангенрейсмаса в практике

Штангенрейсмас повышенного качества

Положение основания, находящегося на противоположной стороне губки рамки, позволяет вплотную приблизить изделие к штанге. Разметочная ножка, оснащенная твердым сплавом, обеспечивает долговечность. Винты, соединяющие основание со штангой, удобны для регулировки при установке прямого угла.

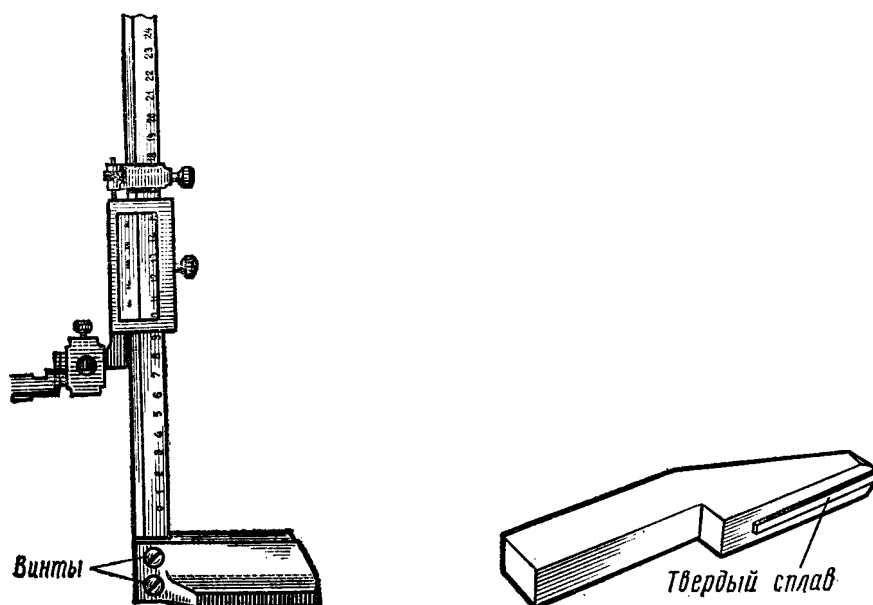


Рисунок 14.41 - Штангенрейсмасы повышенного качества

14.1.1.2 Микрометрические измерительные средства

В машиностроении широко применяют микрометрические инструменты общего назначения: микрометры, микрометрические глубиномеры и нутромеры. Метод измерения прямой, абсолютный.

Микрометры (ГОСТ 6507 – 90)

Микрометры предназначены для наружных измерений. Цена деления 0,01 мм.

Измерительное перемещение микрометрического винта 25 мм. Верхний предел измерений 600 мм.

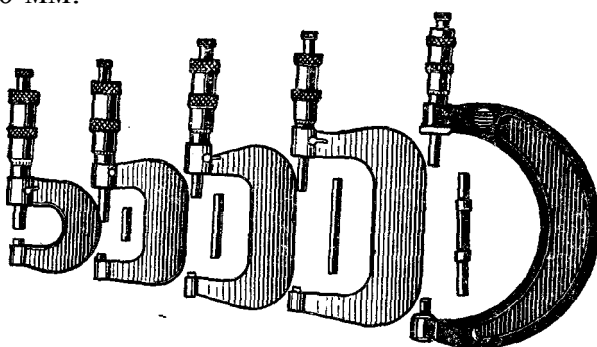
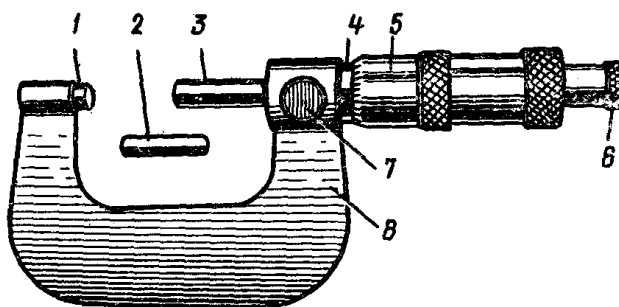


Рисунок 14.42 - Микрометры типа МК.

Основные части микрометра

К микрометрам с нижним пределом 25 мм и более прилагаются установочные меры для проверки нулевого положения. Микрометры с верхним пределом свыше 300 мм имеют сменную или передвигающую пятку для увеличения диапазона измерений до 50 мм.



1 — пятка, 2 — установочная мера, 3 — микрометрический винт, 4 — стебель, 5 — барабан, 6 — трещотка, 7 — стопор, 8 — скоба

Рисунок 14.43 - Основные части микрометра

Трещотка обеспечивает постоянное измерительное усилие

У микрометров типа МК допускается измерительное усилие (700 ± 200) гс.



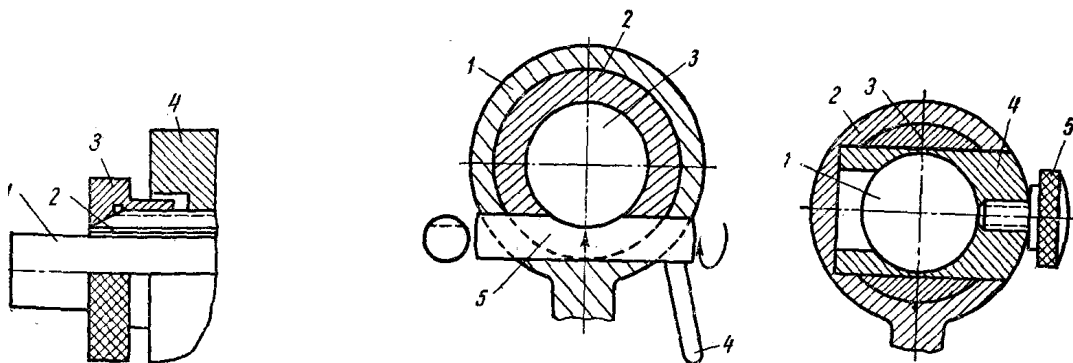
а) Трещотка с торцовыми зубьями
1 — штифт, 2 — пружина,
3 — храповик.

б) Трещотка с зубьями на конце
1 — пружина, 2 — корпус,
3 — шлицевая втулка, 4 — штифт.

Рисунок 14.44 - Типы применяемых трещоток

Положение микрометрического винта фиксируется стопором

Виды стопоров



а) Цанговый
1 - микровинт
2 - разрезная гильза
3 - гайка, 4 - скоба

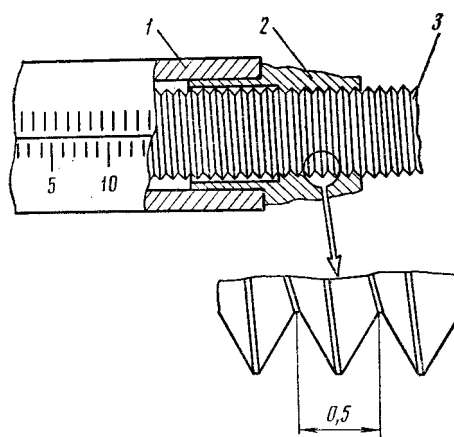
б) Эксцентриковый:
1 - скоба, 2 - стержень
3 - микровинт, 4 - ручка,
5 - эксцентрик

в) С зажимным винтом:
1 - микровинт, 2 - скоба
3 - стержень, 4 - втулка
5 - зажимной винт

Рисунок 14.45 - Виды стопоров

В микрометрических инструментах используется винтовая пара, где продольное перемещение винта прямо пропорционально шагу резьбы и углу поворота винта

За один оборот микрометрический винт перемещается вдоль оси на шаг резьбы (0,5 мм).



1 — стержень, 2 — резьбовая втулка, 3 микровинт

Рисунок 14.46 - Винтовая пара

Барaban

Барабан разделен по окружности на 50 равных частей.

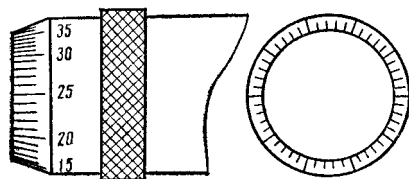
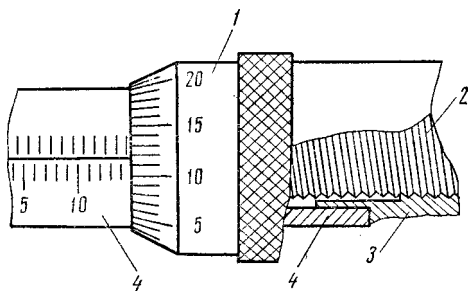


Рисунок 14.47 - Барабан

Цена деления микрометрических инструментов 0,01 мм

При повороте на одно деление микрометрический винт 2, соединенный с барабаном 1, перемещается вдоль оси на $\frac{1}{50}$ шага, т. е. $0,5 \text{ мм} : 50 = 0,01 \text{ мм}$, являющейся ценой деления микрометра.



1 — барабан, 2 — микровинт, 3 — резьбовая втулка, 4 — стебель

Рисунок 14.48 - Шкала микрометра

Чтение показаний

Целое число миллиметров и половину миллиметра отсчитывают краем скоса барабана по шкале стебля. Сотые доли миллиметра определяют по порядковому номеру штриха барабана, совпадающего с продольным штрихом стебля.

Скос на барабане для шкалы сотых долей миллиметра приближает ее к шкале стебля и тем предохраняет от искажений при чтении показаний (параллакса).

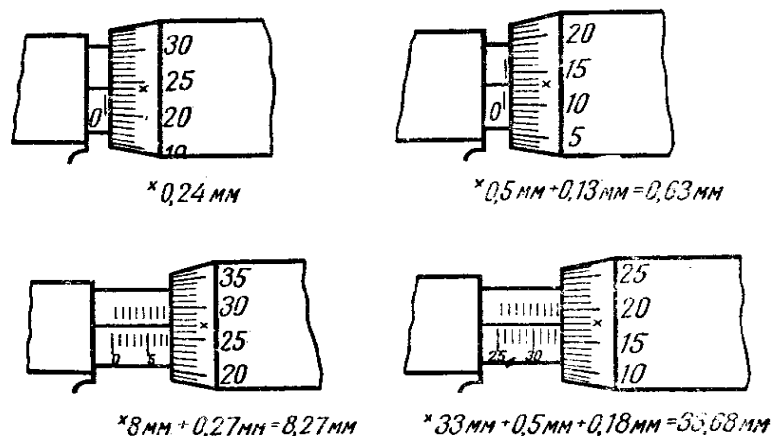


Рисунок 14.49 - Чтение показаний на микрометре

Проверка нулевого положения микрометра

При соприкосновении измерительных поверхностей микрометра с измерительными поверхностями установочной меры или непосредственно между собой (при пределах измерения 0—25 мм) нулевой штрих барабана должен совпадать с продольным штрихом стебля, а скос барабана должен открывать нулевой штрих стебля.

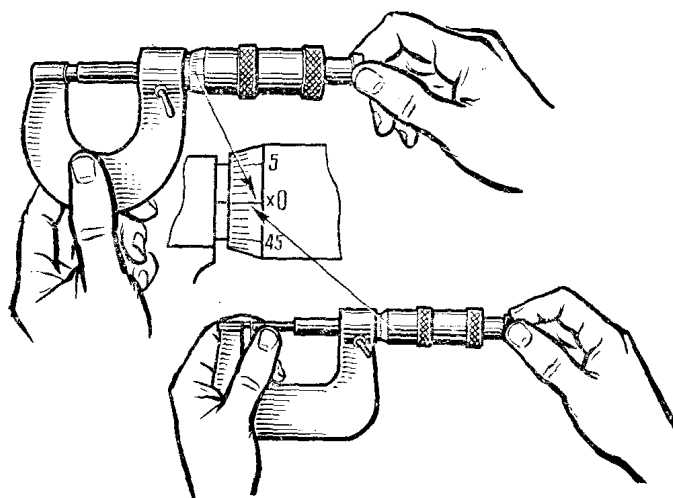


Рисунок 14.50 - Установка на нуль

Неправильное нулевое положение микрометра

При неправильных показаниях микрометра надо произвести установку его на нуль.

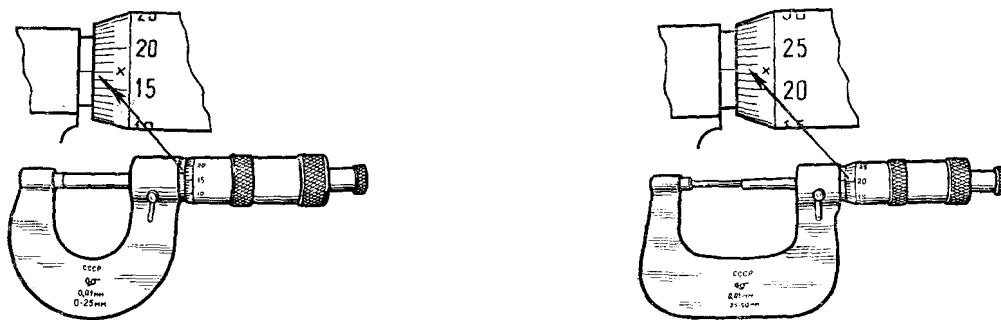


Рисунок 14.51 - Неправильное положение нуля микрометра

Последовательность действий при установке микрометра на нуль

Если после соприкосновения измерительных поверхностей с установочной мерой или между собой (в пределах измерения микрометра 0—25 мм) показания микрометра неправильны, необходимо:

- 1) закрепить микровинт стопором;
- 2) разъединить барабан с микровинтом;
- 3) установить барабан и закрепить его;
- 4) произвести проверку нулевого положения.

Закрепление микровинта стопором

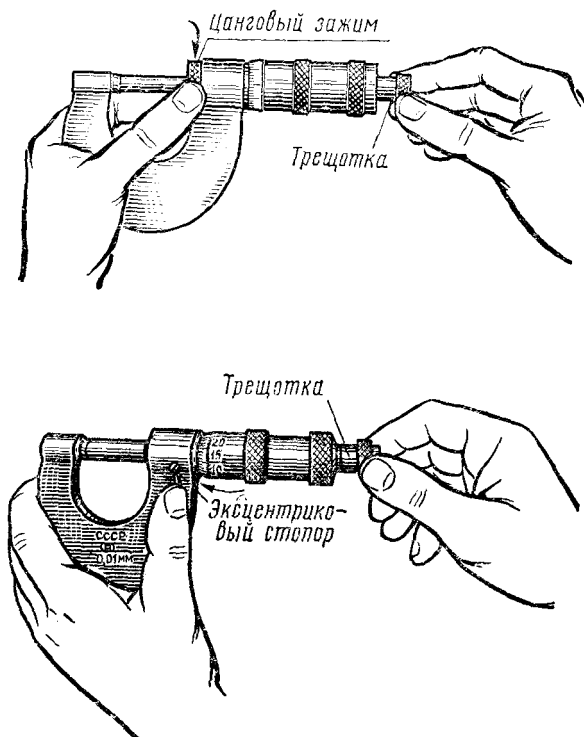
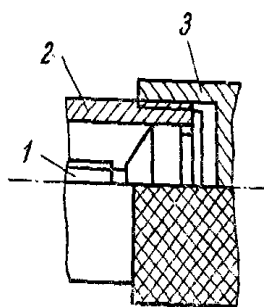


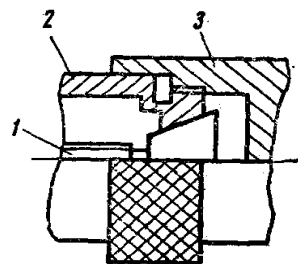
Рисунок 14.52 - Закрепление микровинта

Соединение барабана с микровинтом



Микрометр завода «Калибр»

1 — микровинт, 2 — барабан,
3 — корпус трещотки.

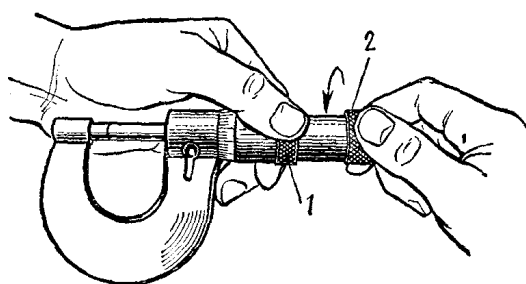


Микрометр завода
«Красный инструментальщик»

1 — микровинт, 2 — барабан,
3 — корпус трещотки

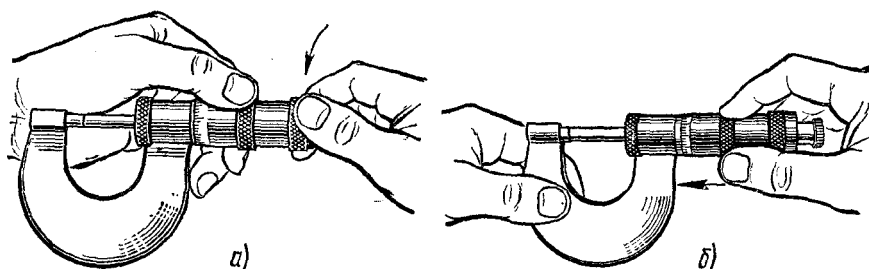
Рисунок 14.53 - Соединение барабана с винтом микрометра

Отсоединение барабана от микровинта



1 — барабан, 2 — корпус трещотки

Рисунок 14.54 - Микрометр завода «Калибр»:



а — отвинчивание корпуса трещотки,
б — отсоединение барабана от микровинта

Рисунок 14.55 - Микрометр завода «Красный инструментальщик»:

Установка барабана и закрепление его

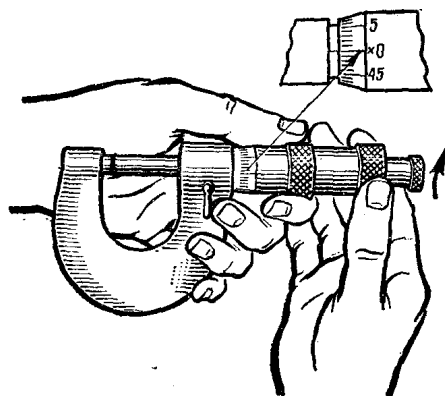


Рисунок 14.56 - Установка барабана

Последовательность действий при измерении микрометром

Перед измерением протирают измерительные поверхности и устанавливают микрометр на размер немного более проверяемого; слегка прижимают пятку к проверяемой поверхности; доводят с помощью трещотки микровинт до соприкосновения с проверяемой поверхностью; покачиванием проверяют отсутствие перекоса; стопорят микровинт и читают показание

Протирание измерительных поверхностей

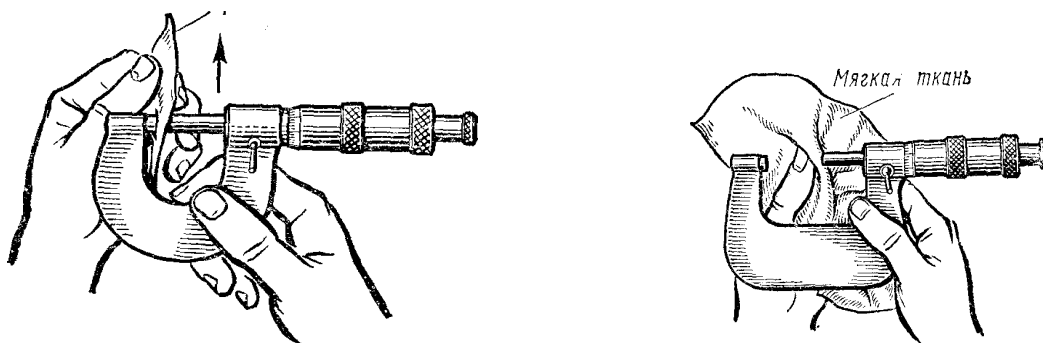


Рисунок 14.57 - Протирка перед работой

Положение измерительных поверхностей относительно измеряемых

При измерении микрометром диаметра цилиндрической детали линия измерения должна быть перпендикулярна образующей и проходить через центр.

При измерении микрометром расстояния между параллельными плоскостями линия измерения должна быть им перпендикулярна.

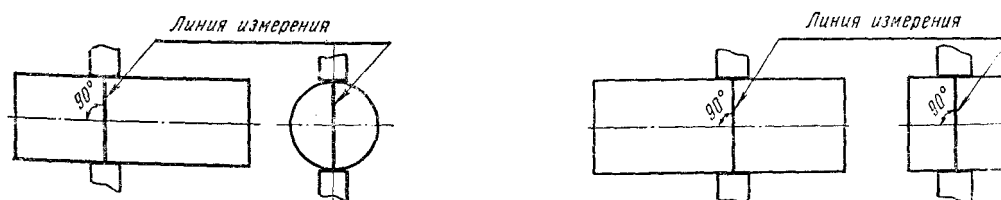


Рисунок 14.58 - Положение поверхностей при измерении

Доведение микровинта до проверяемой поверхности закрепленной детали при горизонтальном положении оси микрометра

Измеряя закрепленную деталь при горизонтальном положении оси микрометра, левой рукой поддерживают скобу посередине, слегка прижимая пятку к проверяемой поверхности. Находящимися на накатанном пояске трещотки большим и указательным пальцами правой руки перемещают микровинт до соприкосновения его с проверяемой поверхностью (до появления «пощелкивания» трещотки).

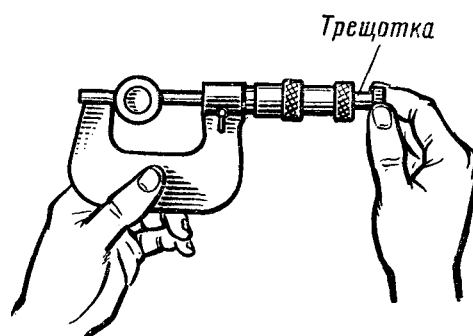


Рисунок 14.59 - Проверка влияния микровинта

Измерение микрометром, закрепленным в стойке

Стойка для микрометра освобождает левую руку. Скоба микрометра закреплена в стойке под углом 40—50°, что обеспечивает хорошую видимость, так как лучи, направленные из глаза наблюдателя, примерно перпендикулярны касательной плоскости к стеблю, проходящей через ее шкалу.

Левая рука должна находиться за скобой и захватывать деталь недалеко от микрометрического винта, слегка прижимая деталь к пятке, а большим и указательным пальцами правой руки с помощью трещотки доводят микровинт до соприкосновения с поверхностью детали.

Во избежание преждевременного износа микрометра нельзя его использовать в виде скобы.

При чтении показаний микрометр следует держать прямо перед глазами во избежание искажений результатов измерений

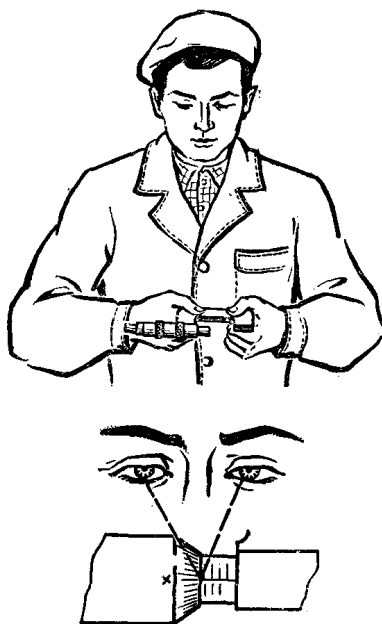


Рисунок 14.60 - Чтение показаний

Измерение расстояния между осями

Из показаний микрометра надо вычесть полу сумму диаметров штифтов.

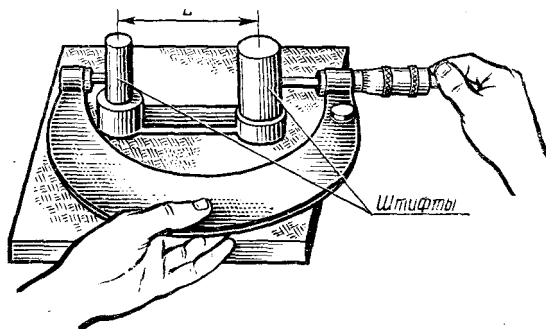


Рисунок 14.61 - Измерение сложных параметров

Проверка параллельности валов

Параллельность валов проверяют сравнением показаний микрометра при измерениях в нескольких местах, предварительно убедившись в их правильной геометрической форме.

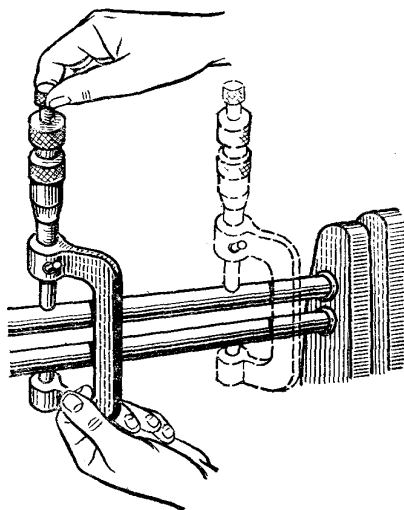


Рисунок 14.62 - Измерение различных поверхностей

Микрометр для измерения толщины стенок труб(при внутреннем диаметре трубы не менее 12 мм)

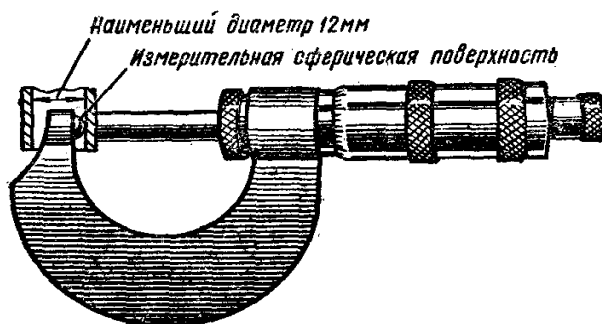
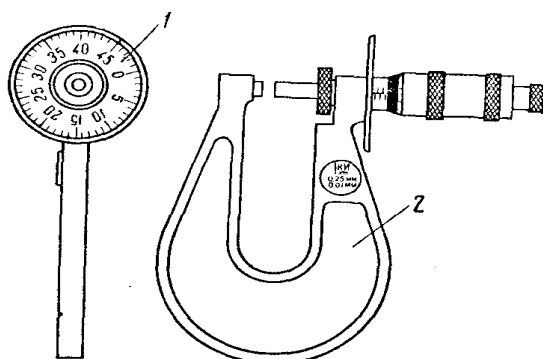


Рисунок 14.63 - Измерение толщины стенок труб

Микрометр с циферблатом

Микрометр с циферблатом предназначен для измерения толщины листового материала.



1 — циферблат, 2 — удлиненная скоба

Рисунок 14.64 - Микрометр с циферблатом

Микрометр со вставками

Предназначен для измерения мягких материалов. Диаметр вставок 12 мм.

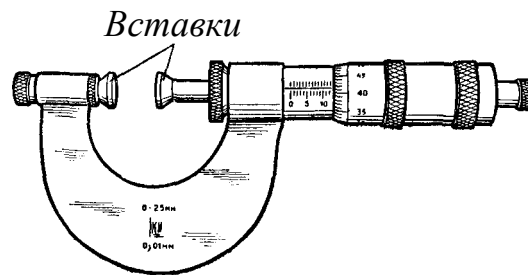
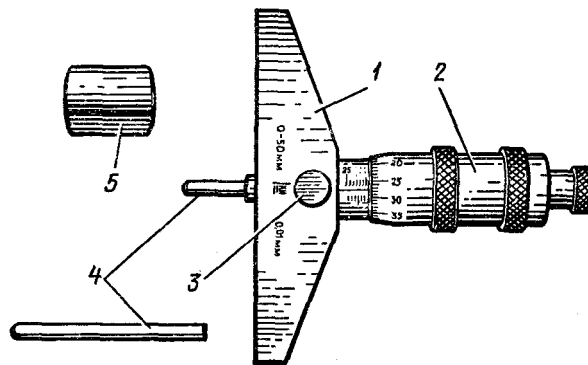


Рисунок 14.65 - Микрометр со вставками

Микрометрический глубиномер (ГОСТ 7470—92)

Верхний предел измерений 100 и 150 мм устанавливается с помощью сменных измерительных стержней.

Широкая измерительная поверхность основания и сменные измерительные стержни малого сечения обеспечивают устойчивость и возможность производить измерения глубин в отверстиях и пазах небольших размеров.



1 — основание, 2 — микрометрическая головка, 3 стопор, 4 — сменные измерительные стержни, 5 установочная мера

Рисунок 14.66 - Глубиномер микрометрический

Деления и цифры шкал

При ввинчивании микровинта микрометрического глубиномера показания не уменьшаются, как у микрометра, а увеличиваются. Поэтому цифры на шкале стебля и барабана указаны в обратном порядке: на стебле цифры увеличиваются справа налево, а на барабане — по часовой стрелке.

Чтение показаний

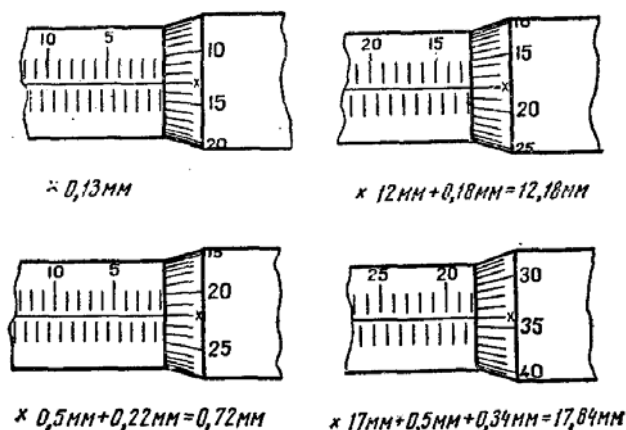
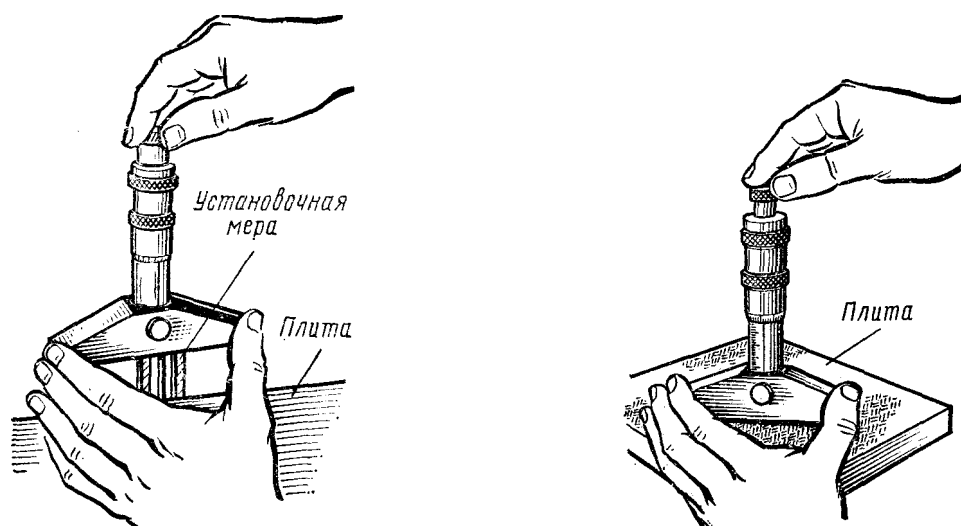


Рисунок 14.67 - Чтение показаний на микрометре

Проверка нулевого положения микрометрического глубиномера



При пределах измерения 0—25 мм

При верхнем пределе измерения
свыше 25 мм (50, 75 и 100 мм)

Рисунок 14.68 - Проверка нулевого положения глубиномера

Измерение микрометрическим глубиномером

Левой рукой прижимают основание к поверхности детали, а правой рукой с помощью трещотки в конце хода измерительного стержня доводят измерительный стержень до соприкосновения с другой поверхностью детали и стопорят микровинт.

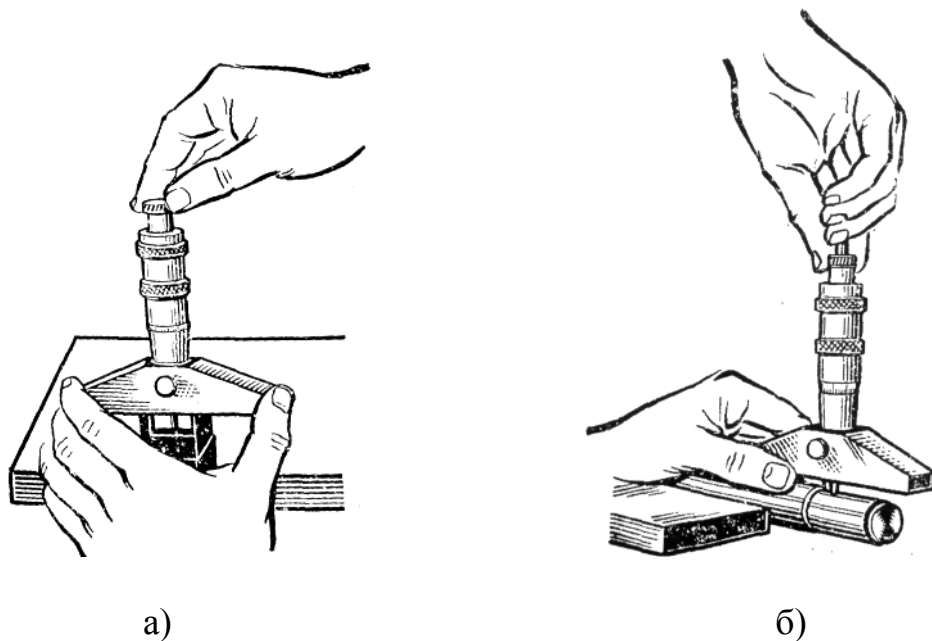
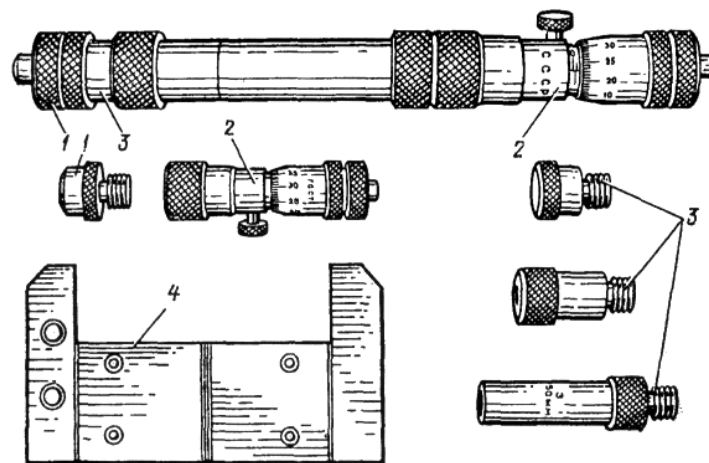


Рисунок 14.69 - Измерение микрометрическим глубиномером

Микрометрический нутромер (ГОСТ 10—88)

Микрометрические нутромеры изготавливаются с пределами измерений: 50—75, 75—175, 75—600, 150—1250, 800—2500, 1250—4000, 2500—6000, 4000—10000 мм.



1 — наконечник, 2 — микрометрическая головка, 3 — удлинители, 4 — установочная мера

Рисунок 14.70 - Микрометрический нутромер

Выбор удлинителей

От проверяемого размера отнимают нижний предел измерения микрометрической головки с наконечником. Затем выбирают удлинители по размерам, обеспечивающим их наименьшее количество (от большего к меньшему). Сумма нижнего предела измерения микрометрической головки с

наконечником и удлинителей должна быть меньше требуемого размера, но не более чем на разность между пределами измерения микрометрической головки.

Чтение показаний

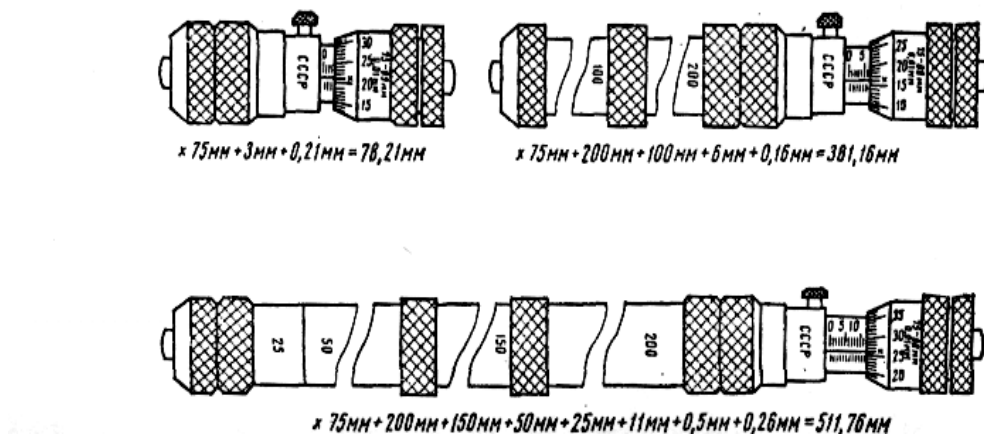


Рисунок 14.71 - Чтение показаний

Положение измерительных поверхностей относительно проверяемых

При измерении цилиндрического отверстия линия измерения должна быть наибольшим размером в плоскости, перпендикулярной оси отверстия, и наименьшим размером в плоскости, проходящей через ось.

При измерении расстояния между параллельными плоскостями, правильное положение измерительных поверхностей (отсутствие перекоса) обеспечивает наименьшие (точные) показания.

Измерение микрометрическим нутромером

Правильное положение микрометрического нутромера находят его покачиванием при легком контактировании измерительных поверхностей с деталью.

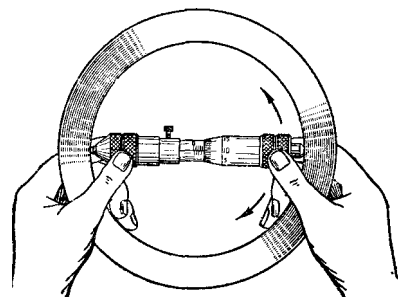
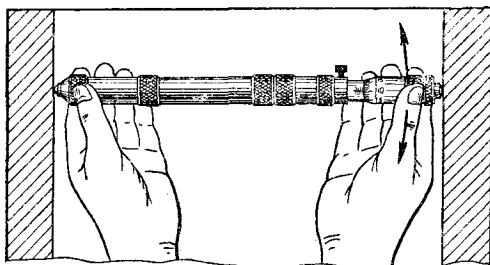


Рисунок 14.72 - Измерение микрометрическим нутромером

Хранение микрометрических инструментов

После окончания работы у микрометрических инструментов надо ослабить стопор и микрометрический винт, протереть инструмент, смазать антикоррозионным составом и уложить в футляр.

14.1.1.3 Плоскопараллельные концевые меры длины (ГОСТ 9038—90*)

Плоскопараллельные концевые меры применяют для передачи размера единицы длины к изделию, проверки и градуировки средств измерений, для точных измерений изделий и точной разметки. К рабочим сторонам концевых мер длины предъявляют высокие требования в отношении плоскостности, параллельности, класса шероховатости поверхности и точности размера между ними. Одним из основных свойств концевых мер, обеспечивающих их широкое применение, является притираемость — способность прочно соединяться между собой при прикладывании и надвигании одной меры на другую при некотором давлении. Концевые меры комплектуют в наборы, которые позволяют составлять блоки требуемых размеров из небольшого количества мер.

Длина концевой меры

Рабочим размером концевой меры является длина AB , определяемая длиной перпендикуляра, опущенного из какой-либо точки измерительной поверхности на противоположную. Длина концевой меры характеризуется ее отклонением от номинального размера — наибольшая по абсолютному значению разность между длиной меры в любой точке и номинальной длиной меры — и отклонением от плоскопараллельности — разность между ее наибольшей и наименьшей длинами.

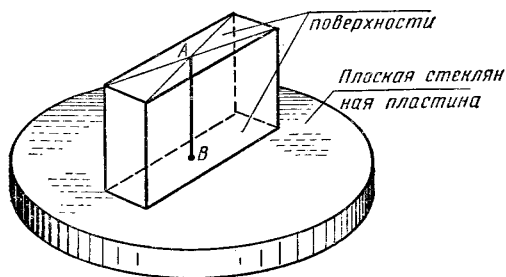


Рисунок 14.73 - Пример с концевой мерой

В зависимости от величины отклонения длины мер от номинального размера и плоскопараллельности устанавливаются четыре класса концевых мер: 0; 1; 2; 3-й. Для концевых мер, находящихся в эксплуатации, устанавливаются дополнительные классы: 4; 5-й.

В зависимости от погрешности (по точности определения отклонений) действительного значения длины мер и отклонения их от плоскопараллельности устанавливаются пять разрядов: 1; 2; 3; 4; 5-й. У мер первого разряда отклонения определены с наименьшей погрешностью.

Наиболее широко применяются наборы, состоящие из 87 и 42 концевых мер (с 4-я защитными). Наиболее широко применяемые наборы концевых мер приводятся в таблице 14.1.

Таблица 14.1 - Наиболее широко применяемые наборы концевых мер

Номинальные размеры, мм	Градация, мм	Число мер	Номинальные размеры, мм	Градация, мм	Число мер
0,5; 1', 0,005	разная	3	1; 1,005	-	2
от 1,01 до 1,50	0,01	50	от 1,01 до 1,09	0,01	9
от 1,6 до 2,0	0,1	5	от 1,1 до 1,9	0,1	9
от 2,5 до 10,0	0,5	16	от 2 до 10	1	9
от 20 до 100	10	9	от 20 до 100	10	9

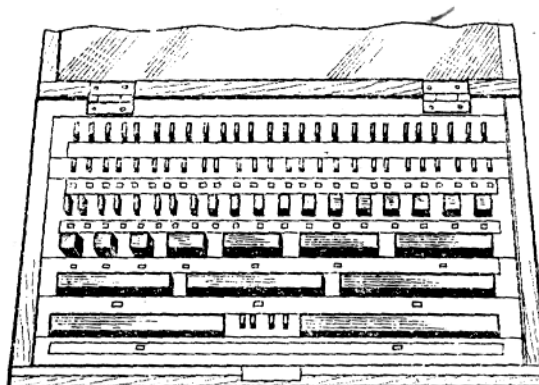


Рисунок 14.73 - Набор из 87 концевых мер

Расчет размеров плоскопараллельных концевых мер для составления их в блоки

При расчете учитывают имеющиеся в наборе размеры концевых плоскопараллельных мер. Первой берут ту меру, которая совпадает несколькими (или одной) последними цифрами с размером блока. Затем из размера блока вычитают размер выбранной меры и берут вторую меру, совпадающую несколькими (или одной) последующими цифрами с остатком. Дальнейший расчет производится в той же последовательности, что обеспечивает наименьшее количество мер в блоке; такой расчет сокращает

время на составление блоков, уменьшает износ концевых мер и повышает точность блоков.

Примеры расчета размеров плоскопараллельных концевых мер

Таблица 14.2 - Концевые меры (при наборе из 87 мер)

Составить блок размером 59,58 мм	Составить блок размером 47,875 мм
1-я мера 1,58 мм	1-я мера 1,005 мм
Остаток 58 мм	Остаток 36,87 мм
2-я мера 8 мм	2-я мера 1,37 мм
Остаток 50 мм	Остаток 35,5 мм
3-я мера 50 мм	3-я мера 5,5 мм
Проверка: $1,58 \text{ мм} + 8 \text{ мм} + 50 \text{ мм} =$ $= 59,58 \text{ мм}$	Остаток 40 мм
	4-я мера 40 мм
	Проверка: $1,005 \text{ мм} + 1,37 \text{ мм} +$ $+ 5,5 \text{ мм} + 40 \text{ мм} = 47,875 \text{ мм}$

Таблица 14.3 Концевые меры (при наборе из 42 мер)

Составить блок размером 49,48 мм	Составить блок размером 37,875 мм
1-я мера 1,08 мм	1-я мера 1,005 мм
Остаток 48,4 мм	Остаток 36,87 мм
2-я мера 1,4 мм	2-я мера 1,07 мм
Остаток 47 мм	Остаток 35,8 мм
3-я мера 7 мм	3-я мера 1,8 мм
Остаток 40 мм	Остаток 34 мм
4-я мера 40 мм	4-я мера 4 мм
Проверка: $1,08 \text{ мм} + 1,4 \text{ мм} + 7 \text{ мм} +$ $+ 40 \text{ мм} = 49,48 \text{ мм}$	Остаток 30 мм
	5-я мера 30 мм
	Проверка: $1,005 \text{ мм} + 1,07 \text{ мм} +$ $+ 4 \text{ мм} + 30 \text{ мм} = 37,875 \text{ мм}$

Составление плоскопараллельных концевых мер в блоки

Выбранные меры освобождают от смазки (промывают авиационным бензином) и протирают чистой мягкой тканью. Наличие хорошей плоскости и высший класс шероховатости рабочих сторон концевых мер обеспечивает их притираемость – сцепление поверхностей при их относительном перемещении под небольшим давлением, что используют при составлении концевых мер в блоки.

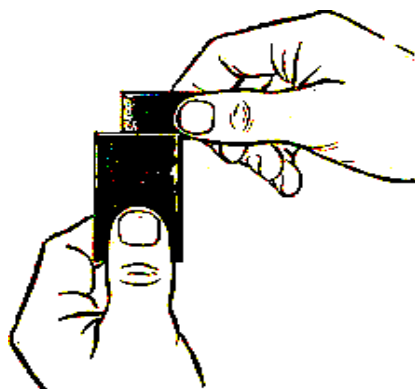


Рисунок 14.74 - Составление концевых мер

Применение плоскопараллельных концевых мер

При проверке скобы блок концевых мер требуемого размера вводят между проверяемыми плоскостями и проверяют плотность сопряжения. При наличии зазора или чрезмерно плотного соединения изменяется размер блока мер и проверка производится повторно. Действительным размером скобы будет являться тот блок, который удерживается собственной массой, но при уменьшении на 1 мкм выпадает.

При проверке инструментальной погрешности микрометра сопоставляют его показания с размерами блоков мер.

При измерении расстояния между осями валиков блок мер составляют с учетом действительных размеров и диаметров и вводят между валиками. При наличии зазора или чрезмерно плотного соединения изменяют размер блока мер, и проверка производится повторно.

При определении линейных размеров малых зазоров используют метод световой щели, сравнивая определяемые величины с образцами просвета. Если источник освещения расположен сзади щели, невооруженным глазом можно определить величину 0,001 — 0,002 мм.

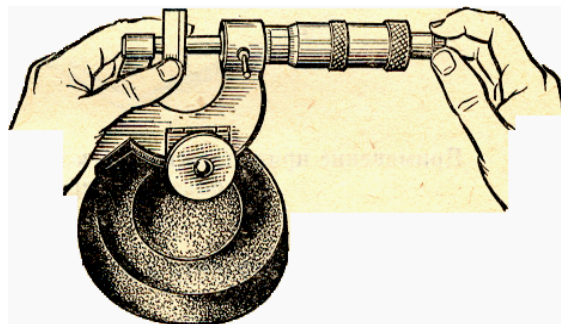
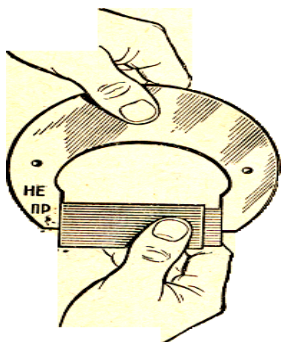
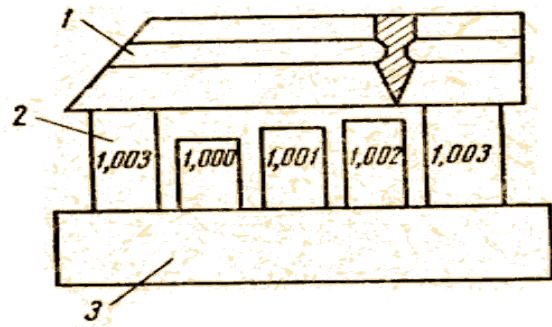
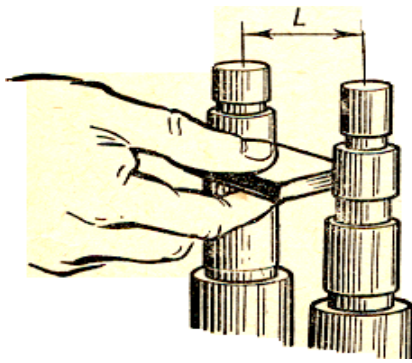


Рисунок 14.75 – Применение концевых мер

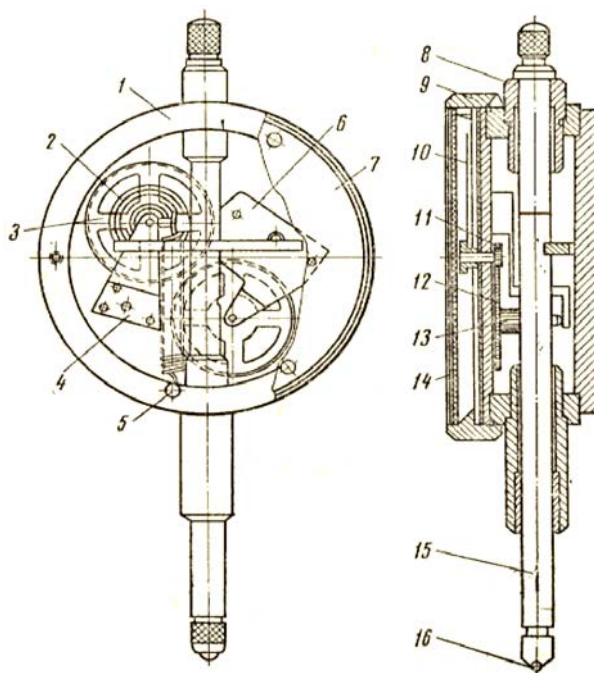


- 1 - лекальная линейка,
- 2 - концевые меры,
- 3 - доведенный брус

Рисунок 14.75, лист 2

Механизм индикаторного типа

Индикаторами часового типа оснащают ряд измерительных приборов общего и специального назначения. Интервалы измерений: от 0 до 5 мм, от 0 до 10 мм и малогабаритные от 0 до 2 мм.



- 1 – корпус, 2 – пружинный волосок, 3 – зубчатое колесо, $z = 100$, 4 – кронштейн, 5 – пружина, 6 – кронштейн, 7 – крышка, 8 – втулка, 9 – поворотное кольцо, 10 – стрелка отсчетных сотых долей миллиметра, 11 – зубчатое колесо, $z = 10$, 12 – зубчатое колесо, $z = 100$, 13 – зубчатое колесо, $z = 16$, 14 – циферблат, 15 – измерительный стержень, 16 – шарик.

Рисунок 14.76 - Индикатор часового типа

Схема индикатора

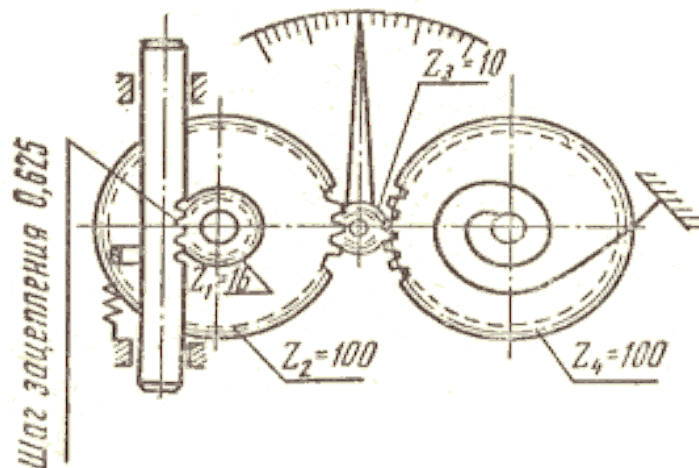
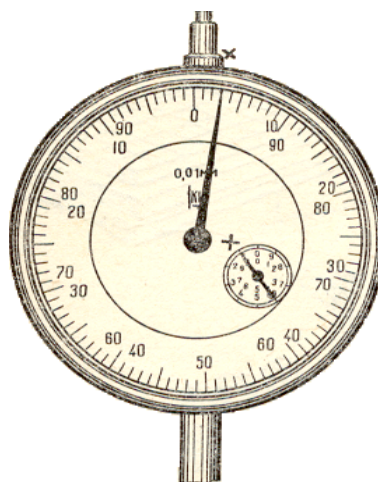


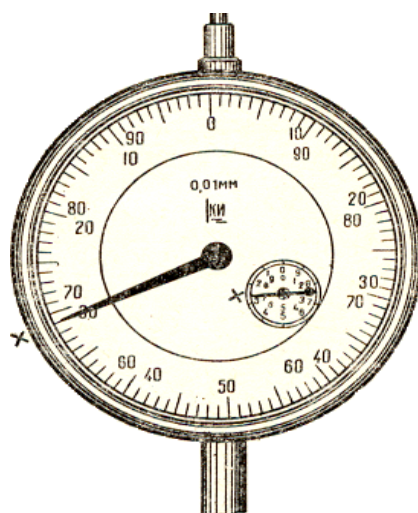
Рисунок 14.77 - Схема индикатора

При перемещении измерительного стержня на 10 мм зубчатое колесо $z_1 = 16$, со стрелкой указателя оборотов, находящейся на его оси, совершает один оборот, так как $10 \text{ мм} / 0,625 \text{ мм} \cdot 16 = 1$. При интервале измерения от 0 до 10 мм малая шкала разделена на десять частей; при интервале от 0 до 5 мм шкала в половину окружности разделена на 5 частей, что обеспечивает малой шкале цену деления 1 мм. Зубчатое колесо $z_2 = 100$ находится на одной оси с зубчатым колесом $z_1 = 16$. При перемещении измерительного стержня на 1 мм это колесо совершает $1/10$ оборота, т.е. перемещается на 10 зубьев, а зубчатое колесо $z_3 = 10$, находящееся в зацеплении с колесом $z_2 = 100$, с большой стрелкой, закрепленной на оси колеса $z_3 = 10$, совершает один оборот. Большая шкала разделена по окружности на 100 частей, что обеспечивает цену деления 0,01 мм.



Прямой ход: $1 \text{ мм} + 0,03 \text{ мм} = 1,03 \text{ мм}$
 Обратный ход: $8 \text{ мм} + 0,97 \text{ мм} = 8,97 \text{ мм}$

Рисунок 14.78 - Чтение показаний на индикаторах



Прямой ход: $2 \text{ мм} + 0,69 \text{ мм} = 2,69 \text{ мм}$.
 Обратный ход: $7 \text{ мм} + 0,31 \text{ мм} = 7,31 \text{ мм}$.

Рисунок 14.78, лист 2

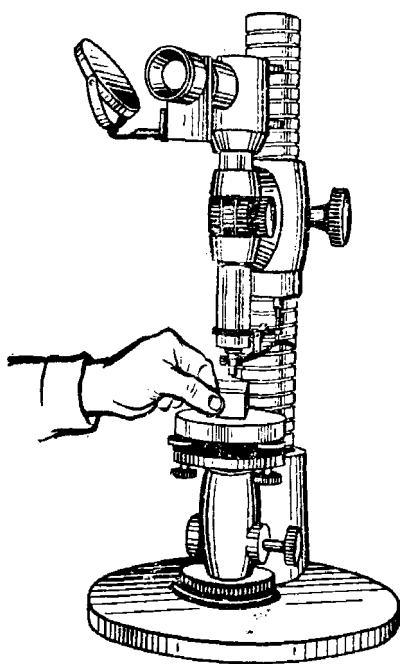
Чтение показаний

Целое число миллиметров отсчитывается стрелкой указателя оборотов по малой шкале. Сотые доли миллиметров отсчитываются стрелкой по большой шкале. При подъеме измерительного стержня (прямой ход) показания читают по наружным цифрам большой шкалы (увеличение по часовой стрелке). При опускании измерительного стержня (обратный ход) показания читают по внутренним цифрам большой шкалы (увеличение против часовой стрелки).

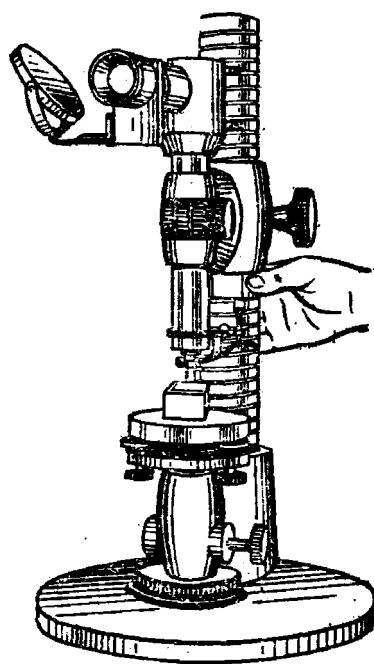
14.1.2 Измерения линейно-угловых величин оптическими приборами

Настройка вертикального оптиметра

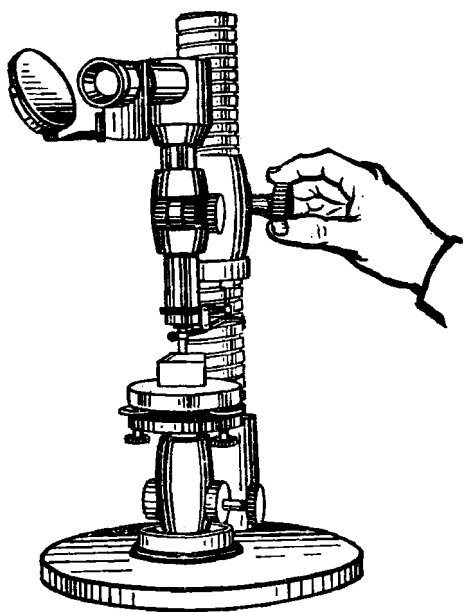
Для настройки оптиметра надо выбрать и закрепить измерительный наконечник (сферический при плоских изделиях и ножевидный или плоский при цилиндрических), установить на стол блок концевых мер, соответствующий номинальному размеру измеряемого изделия, установить кронштейн на колонке по размеру, который немного больше блока концевых мер, закрепить кронштейн, наблюдая в окуляр, установить перемещением стола с блоком концевых мер нулевой штрих шкалы против индекса, закрепить стол, арретированием проверить правильность нулевой установки и снять блок концевых мер со стола, предварительно подняв арретиром наконечник.



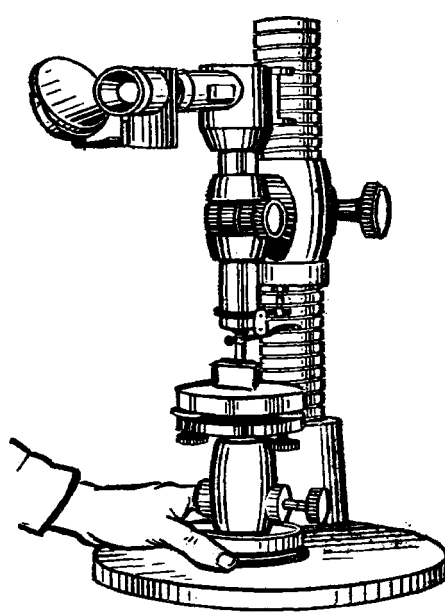
а) Установка блока концевых мер на стол



б) Установка кронштейна

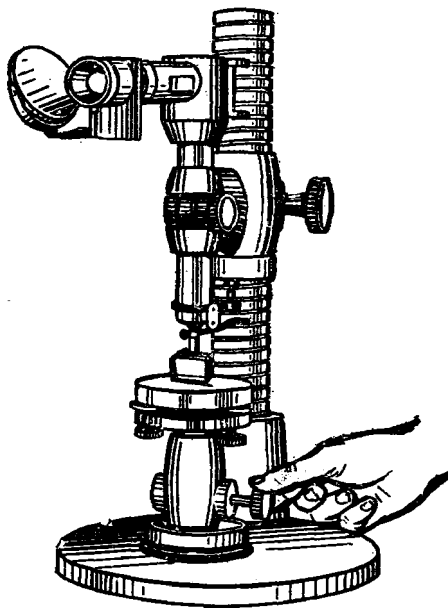


в) Закрепление кронштейна

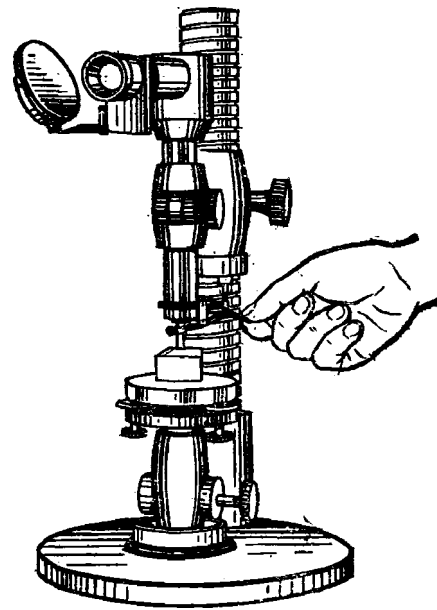


г) Установка стола

Рисунок 14.79 - Установка концевых мер на вертикальный оптиметр



д) Закрепление стола



е) Арретирование

Рисунок 14.79, лист 2

Измерение изделия

С помощью арретира надо поднять измерительный штифт с наконечником, ввести под него измеряемое изделие, опустить измерительный наконечник до соприкосновения с изделием, арретированием проверив постоянство показаний, определить по шкале трубки оптиметра отклонение от размера блока концевых мер и подсчитать действительный размер. При измерении диаметров перемещением изделия находят наименьшее отклонение

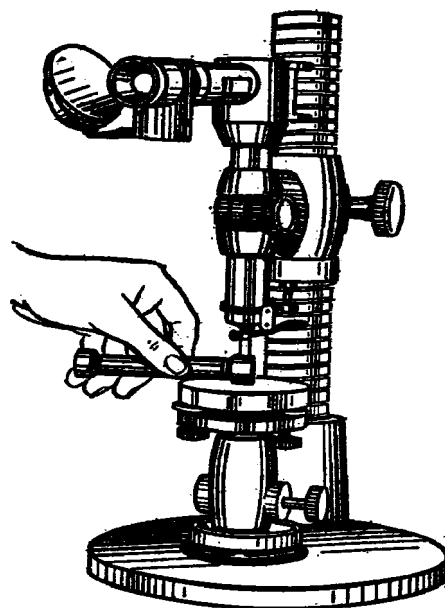
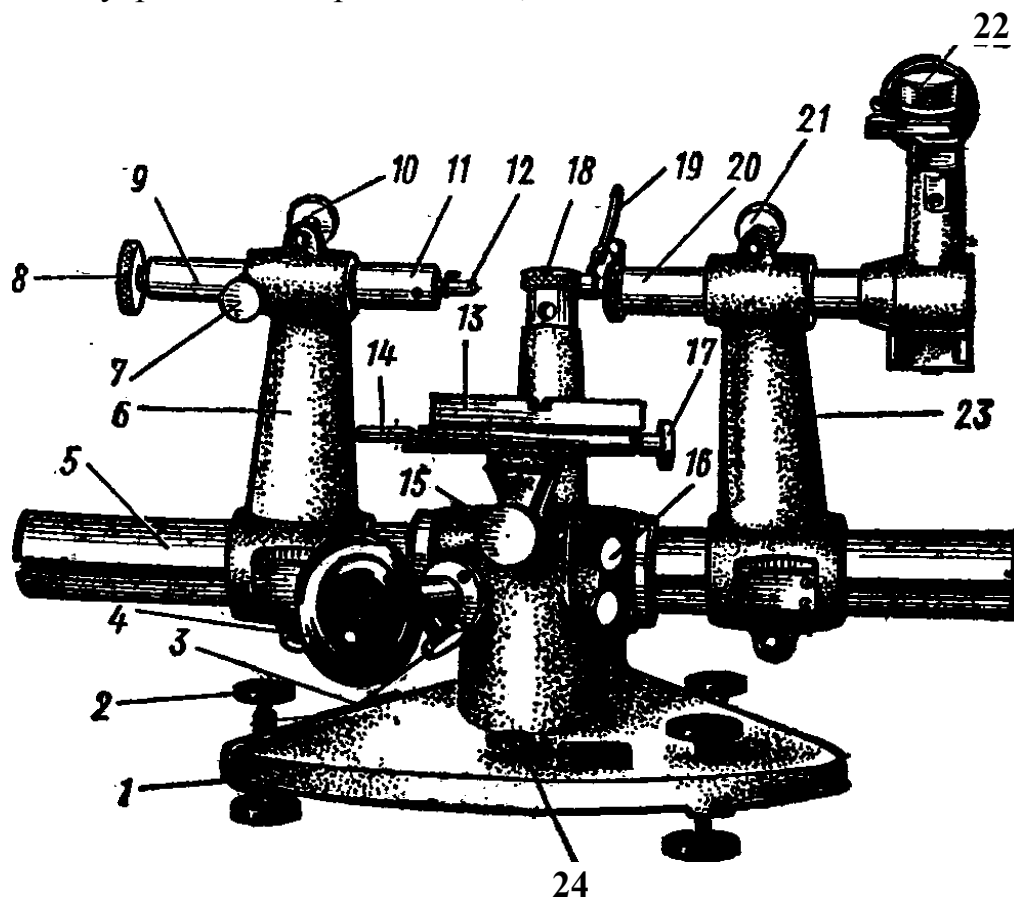


Рисунок 14.80 - Установка изделия на вертикальный оптиметр

Горизонтальный оптиметр ИКГ

Горизонтальный оптиметр предназначен для наружных измерений от 0 до 350 мм и внутренних измерений от 13,5 до 150 мм.

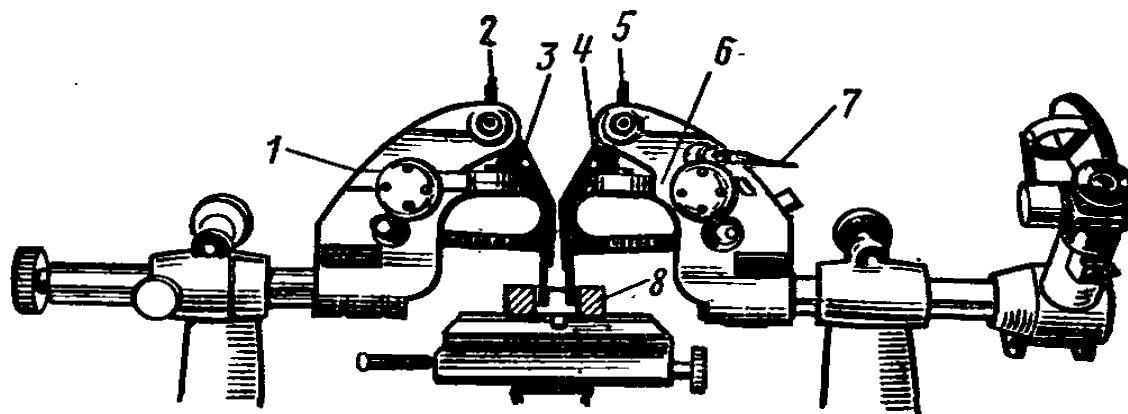


1 — основание, 2 — регулировочный винт основания, 3 — стопор вертикального перемещения, 4 — маховик вертикального перемещения, 5 — вал, 6 — кронштейн пиноли, 7 — стопор микроподачи пиноли, 8 — микроподача пиноли, 9 — пиноль, 10 — зажим пиноли. 11 — регулировочный винт измерительного штифта пиноли, 12 — измерительный наконечник, 13 — предметный стол. 14 — рукоятка поворота стола вокруг вертикальной оси, 15 — эксцентрик поворота вокруг горизонтальной оси со стопором, 16 — винт ограничения вертикального хода, 17 — кремальера поперечного хода. 18 — гайка крепления упора, 19 — арретир, 20 — трубка оптиметра. 21 — зажим трубки оптиметра, 22 — осветительное зеркало, 23 — кронштейн трубки оптиметра, 24 — уровень

Рисунок 14.81 - Горизонтальный оптиметр

Приспособление для внутренних измерений

После настройки оптиметра по плоскопараллельным концевым мерам надо установить измеряемое изделие и по шкале трубки оптиметра определить отклонение.



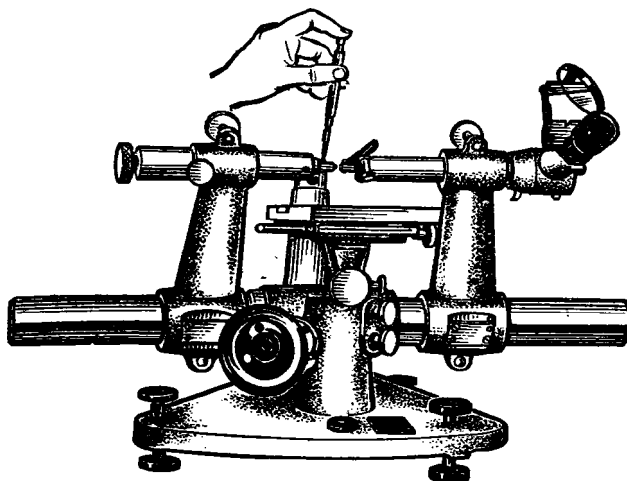
1 - левый держатель, 2 - винт крепления дуги пинולי, 3, 4 - измерительные дуги, 5 - винт крепления дуги трубки оптиметра, 6 - правый держатель, 7 - арретир, 8 - изделие

Рисунок 14.82 - Приспособление для внутренних измерений

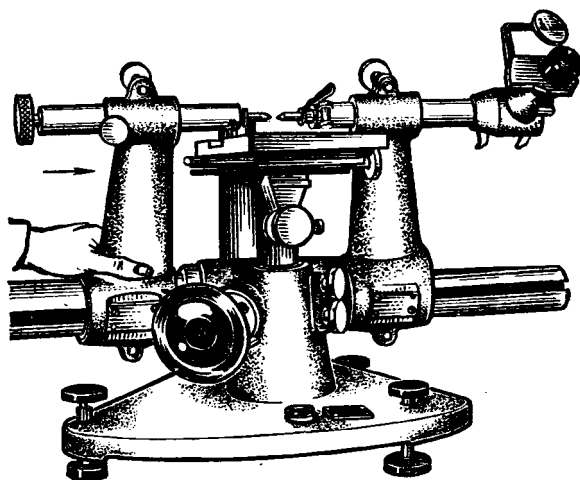
Настройка горизонтального оптиметра

При настройке горизонтального оптиметра надо произвести следующие действия: в зависимости от формы измеряемого изделия и исходя из того, что между изделием и измерительным наконечником контакт должен быть по наименьшей поверхности, надо выбрать наконечники по форме (сферические, плоские круглые или плоские ножевидные), установить их на измерительные штифты прибора и закрепить; сдвинуть кронштейны пинולי и трубки оптиметра, оставив расстояние между наконечниками 1—2 мм; закрепить кронштейны; поместить между наконечниками концевую меру 1—2 мм; микровинтом пинולי приблизительно установить шкалу трубки оптиметра на нуль; наблюдая в окуляр, отверткой следует; вращать установочные винты пинולי в вертикальной и горизонтальной плоскостях, добиваясь требуемых показаний (при плоских наконечниках наименьших показаний, при сферических—наибольших); раздвинуть кронштейны на размер немного более измеряемого изделия; установить блок концевых мер на предметный стол и закрепить струбциной при среднем положении верхней («плавающей») части стола; освободить винт крепления вертикального перемещения стола, маховичком поднять стол и закрепить его (другой рукой), чтобы середина блока концевых мер встала против наконечников; подвинуть кронштейны до соприкосновения их измерительных наконечников с блоком концевых мер; закрепить кронштейны пинולי и трубки оптиметра; микровинтом пинולי

установить изображение шкалы трубки оптиметра приблизительно на нуль; переместить стол в поперечном направлении; повернуть стол в горизонтальном положении до наименьшего отсчета; повернуть головкой эксцентрика стол до наименьшего отсчета; закрепить эксцентрик; окончательно установить шкалу оптиметра на нуль; закрепить пи-ноль; арретированием убедиться в правильности нулевого положения.

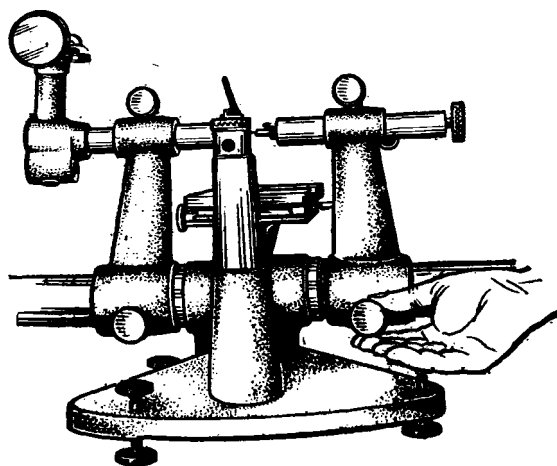


а) Закрепление измерительного наконечника

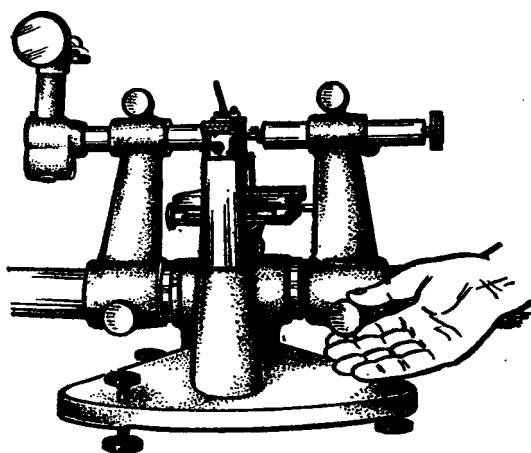


б) Перемещение кронштейна до расстояния 1—2 мм между измерительными наконечниками

Рисунок 14.83 - Настройка горизонтального оптиметра

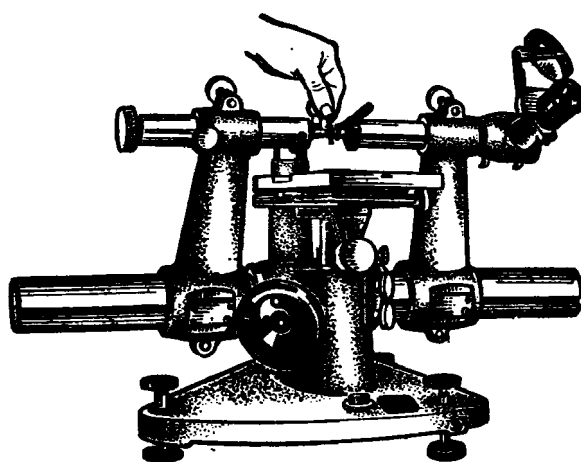


в) Закрепление кронштейна пиноли



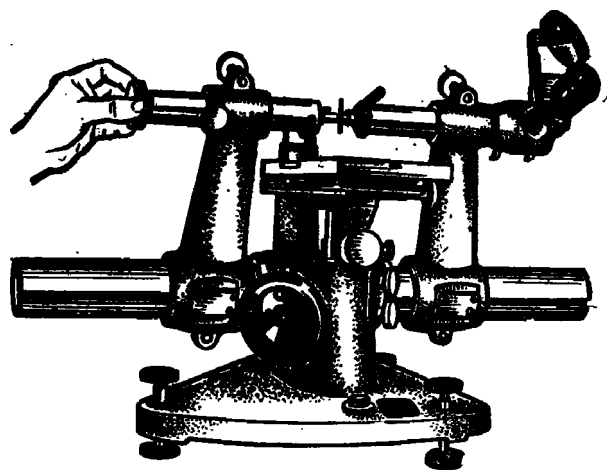
г) Закрепление кронштейна трубки оптиметра

Рисунок 14.83, лист 2

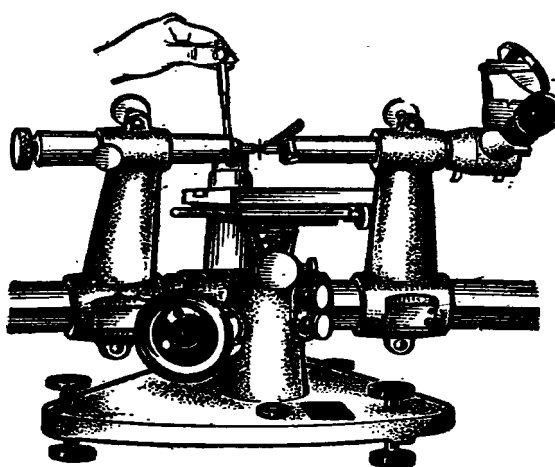


а) Помещение концевой меры 1—2 мм между измерительными наконечниками

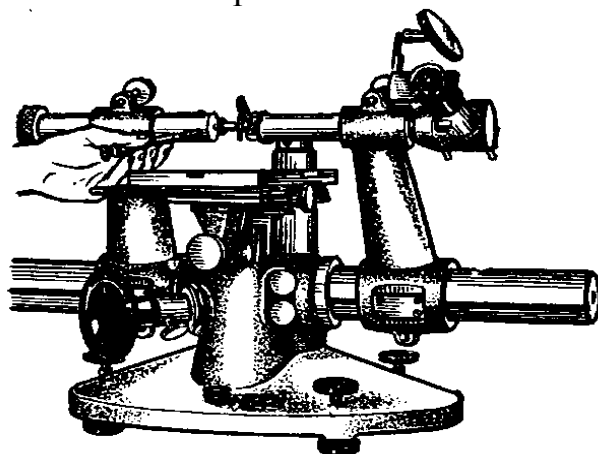
Рисунок 14.84 - Подготовка и настройка горизонтального оптиметра



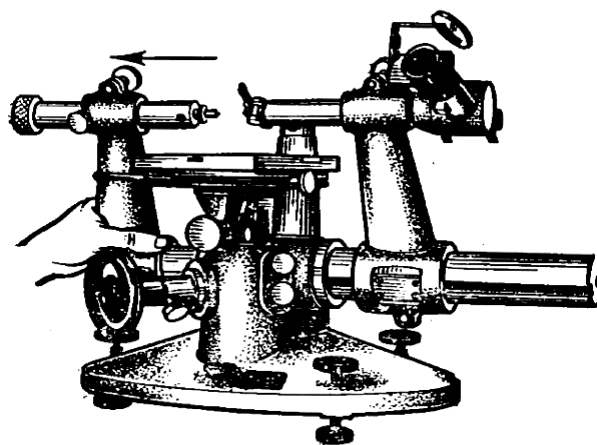
б) Приблизительная установка шкалы трубки оптиметра на нуль



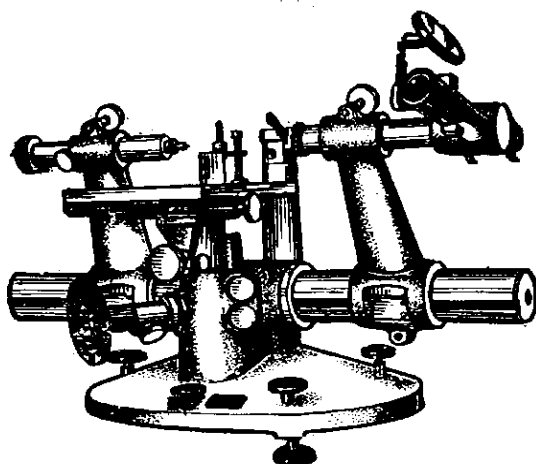
в) Регулировка измерительного наконечника пиноли в вертикальной плоскости



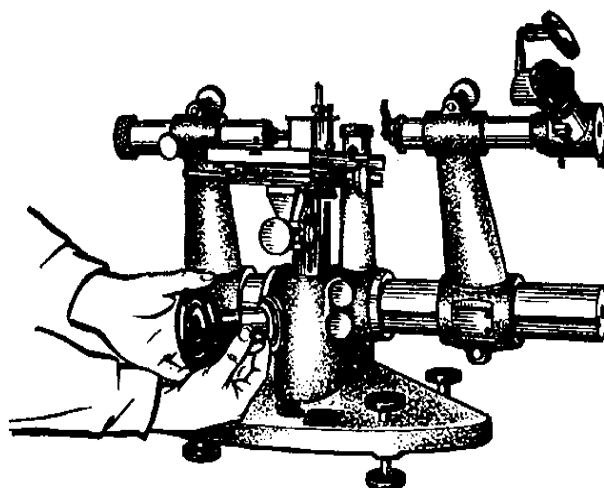
г) Регулировка измерительного наконечника пиноли в горизонтальной плоскости



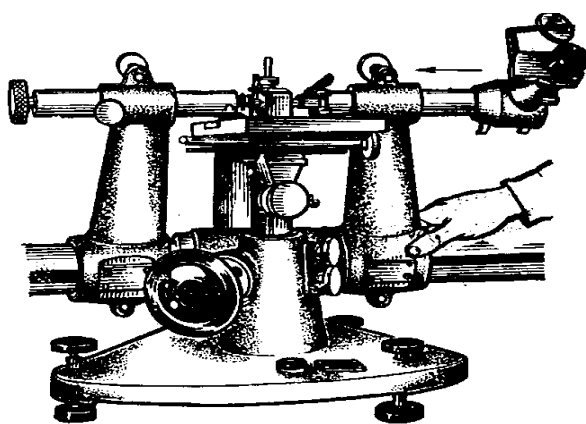
д) Перемещение кронштейнов на размер немного более измеряемого изделия



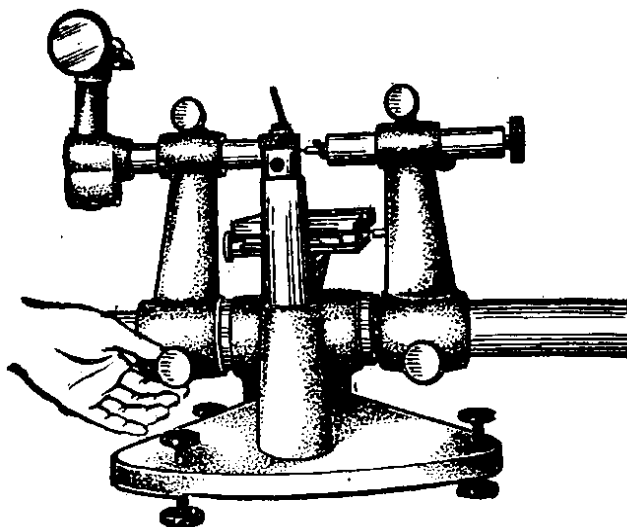
е) Установка блока концевых мер на стол измеряемого изделия



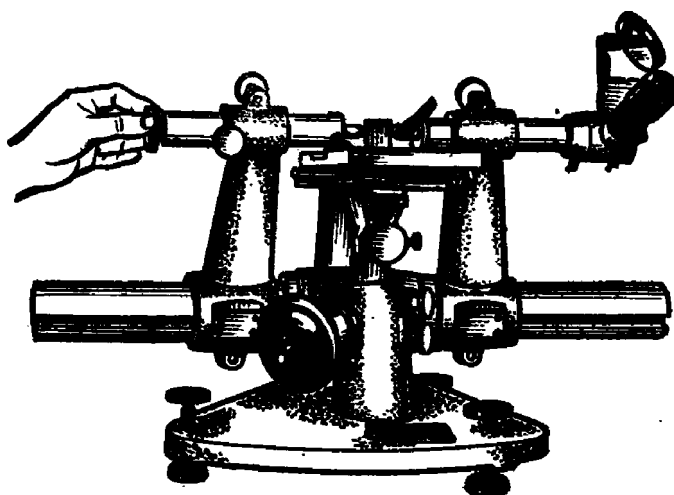
ж) Перемещение и закрепление блока концевых мер в вертикальном направлении



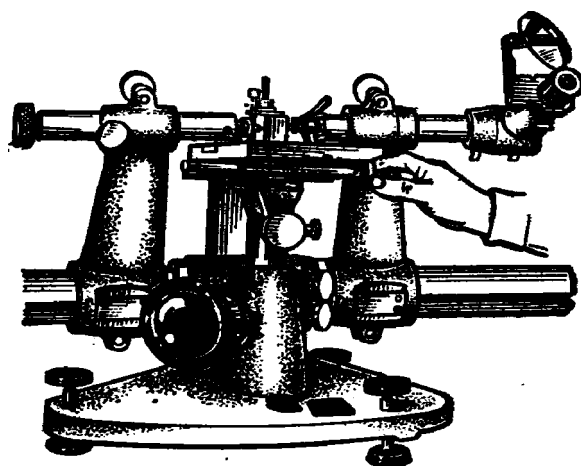
з) Перемещение кронштейнов до соприкосновения измерительных наконечников с блоком концевых мер



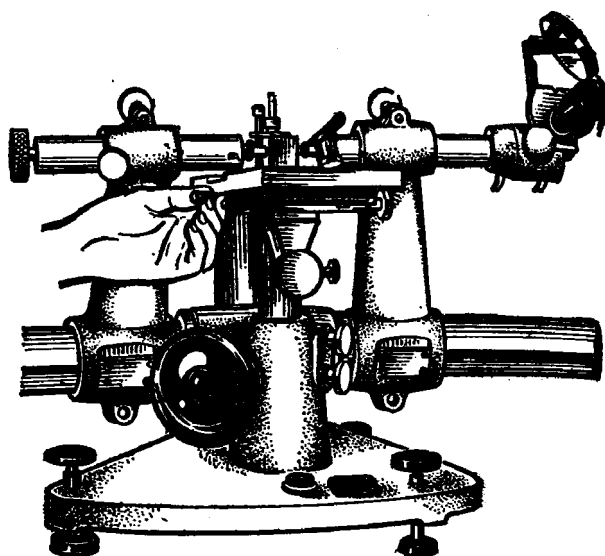
и) Закрепление кронштейнов



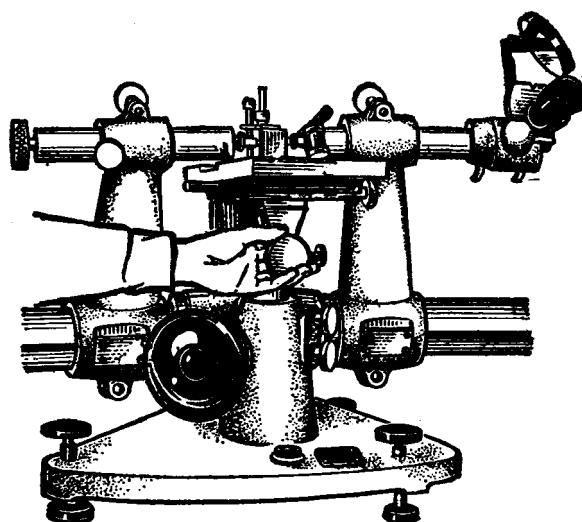
к) Приблизительная установка на нуль шкалы оптиметра



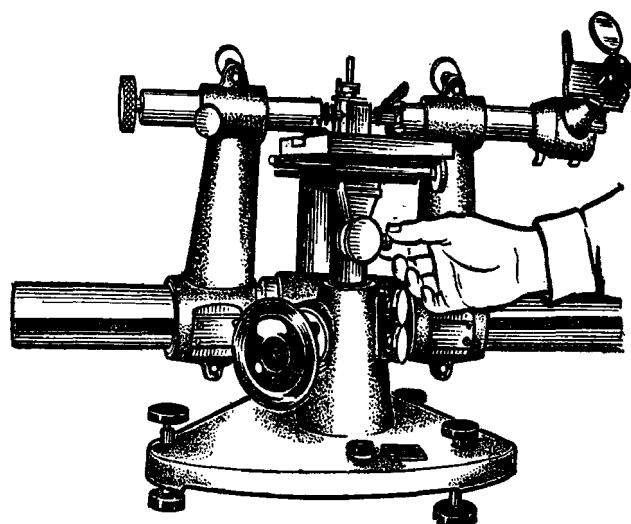
м) Перемещение стола в поперечном направлении



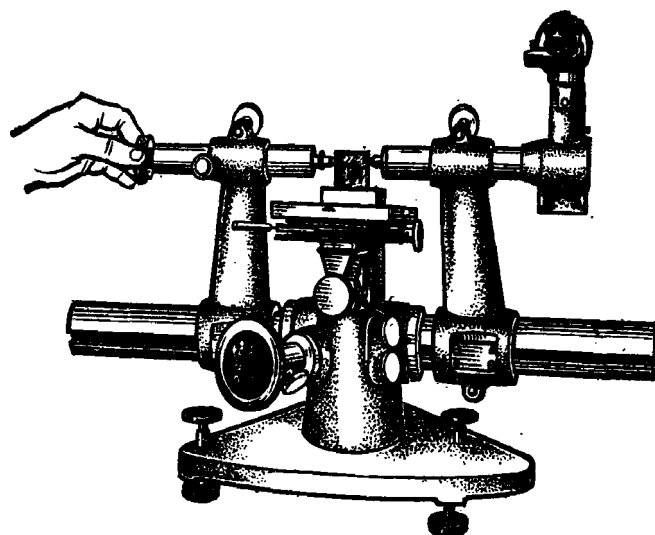
н) Поворот стола вокруг вертикальной оси



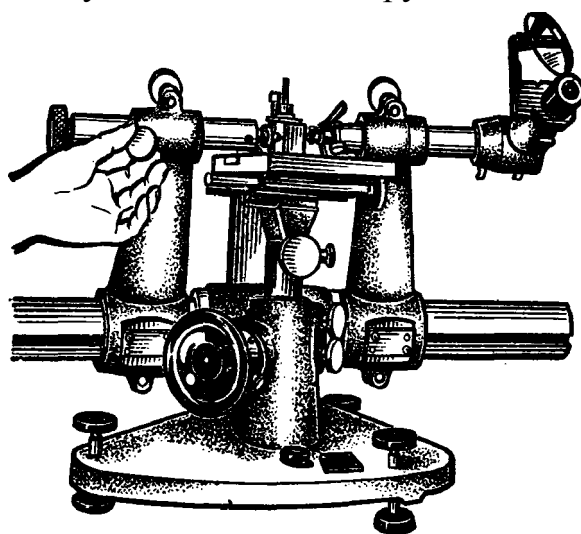
о) Поворот стола вокруг горизонтальной оси



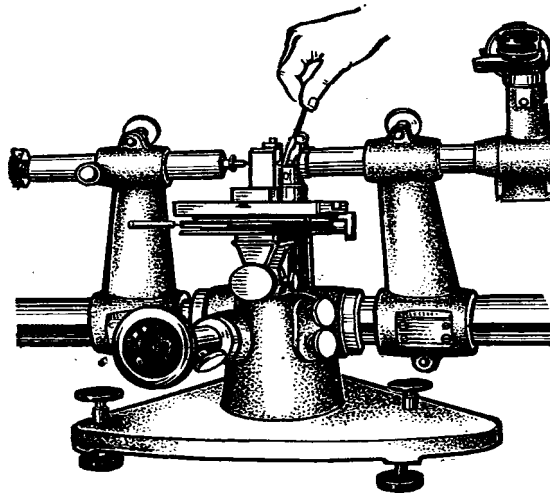
п) Закрепление стола



р) Окончательная установка шкалы трубки оптиметра на нуль



с) Закрепление пиноли

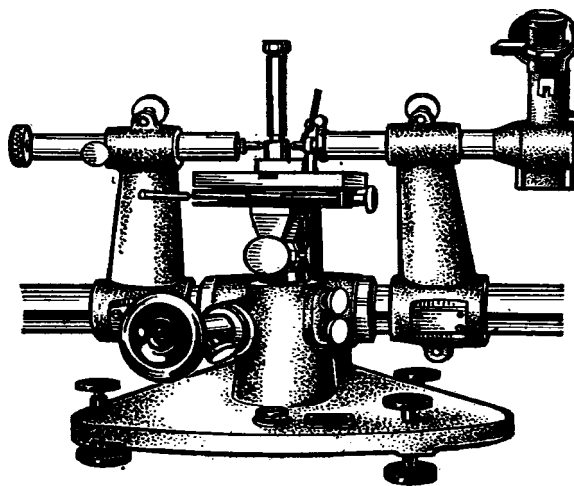


т) Арретирование по блоку концевых мер

Рисунок 14.84, лист 8

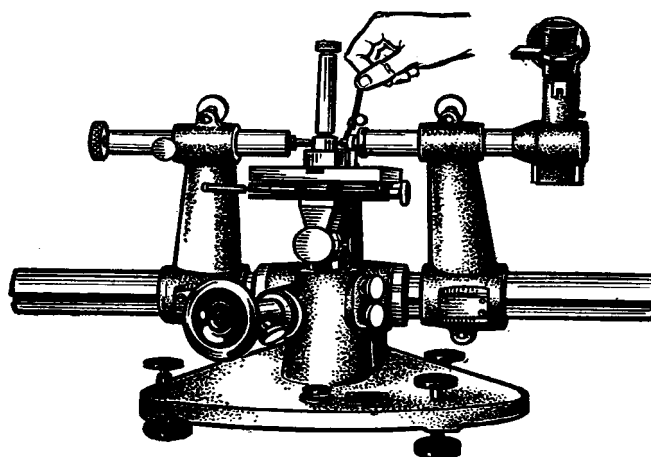
Измерение изделия

После настройки оптиметра надо измеряемое изделие установить на стол, закрепить его, ввести между измерительными наконечниками, устранить перекосы, повторив действия по выравниванию блока концевых мер, после арретирования прочесть отклонения по шкале оптиметра и определить действительный размер.



а) Установка измеряемого изделия

Рисунок 14.85- Измерение изделия на горизонтальном оптиметре



б) Арретирование при измерении изделия

Рисунок 14.85, лист 2

Вертикальный оптический длинномер ИЗВ

Вертикальный оптический длинномер предназначен для наружных линейных измерений.

Пределы измерения по шкале (абсолютным методом) от 0 до 100 мм. Пределы измерения на приборе от 0 до 250 мм. Цена деления шкалы 1 мм. Цена наименьшего деления отсчетного микроскопа со спиральным нониусом 0,001 мм.

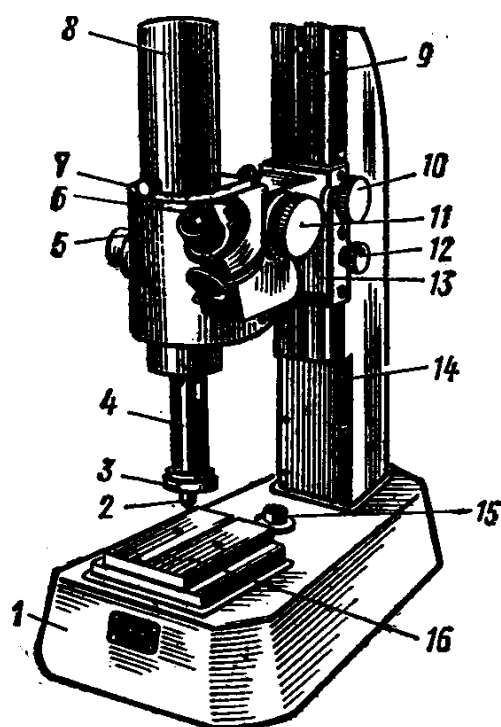
Увеличение отсчетного микроскопа 62*. Линейное поле зрения около 2,5 мм. Измерительное давление с грузовой шайбой 250 гс.

Вертикальный оптиметр показан на рисунке 14.86.

Оптическая схема

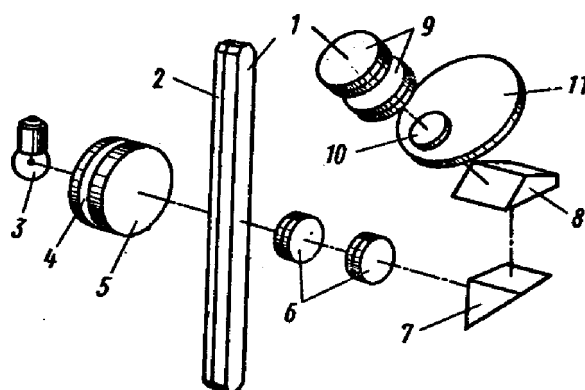
В фокальной плоскости окуляра расположены линейная шкала десятых долей миллиметра и индекс, нанесенные на неподвижной пластине 10, двойные витки спирали Архимеда и сто делений круговой шкалы, нанесенные на вращающейся пластине 11. В поле зрения десять интервалов спирали совмещены с изображением одного интервала миллиметровой шкалы. Каждому интервалу соответствует одна десятая доля миллиметра. Одной десятой доле миллиметра соответствует сто делений круговой шкалы, а одному делению круговой шкалы — одна тысячная миллиметра.

Оптическая схема представлена на рисунке 14.87.



1 — основание, 2 — измерительный наконечник. 3 — грузовая шайба, 4 — измерительный стержень, 5 — патрон освещения. 6 — отсчетный микроскоп, 7 — стопорный винт. 8 — цилиндрический корпус головки. 9 — зубчатая рейка, 10 — маховичок триба, // — маховичок перемещения стержня. 12 — тормозной винт. 13 — кронштейн. 14 — колонка. 15 — уровень, 16 — ребристый столик

Рисунок 14.86 - Вертикальный оптиметр ИЗВ



1 — миллиметровая стеклянная шкала, 2 — покровное стекло, 3 — лампочка, 4 — светофильтр, 5 — конденсор, 6 — объектив микроскопа. 7 и 8 — призмы, отклоняющие пучок света на 45° , 9 — окуляр. 10 — неподвижная пластина, 11 — вращающаяся пластина.

Рисунок 14.87 - Оптическая схема

Чтение показателей

Целые миллиметры и десятые доли миллиметра определяются оцифрованным миллиметровым штрихом, установленным посередине двойного

витка спирали в зоне шкалы десятых долей миллиметра. Сотые и тысячные доли миллиметра определяются отсчетным индексом по круговой шкале.

Пример:

Миллиметровый штрих 12 находится в зоне шкалы десятых долей миллиметра между цифрами 2 и 3. Отсчетный индекс находится в зоне круговой шкалы около числа 72. Отсчет 12,272 мм.

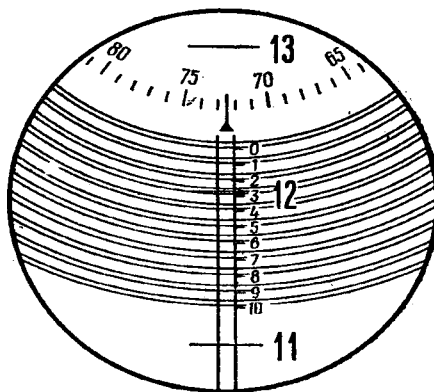
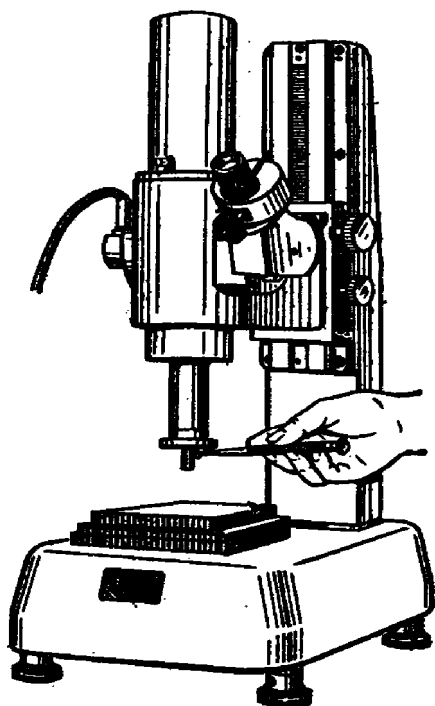


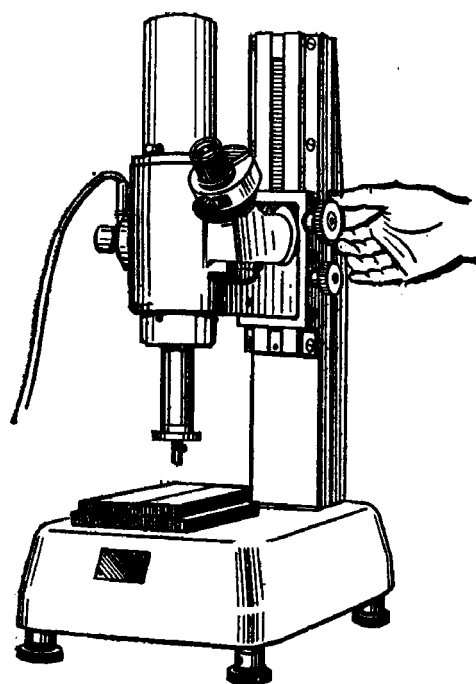
Рисунок 14.88 - Чтение показаний

Измерение абсолютным методом

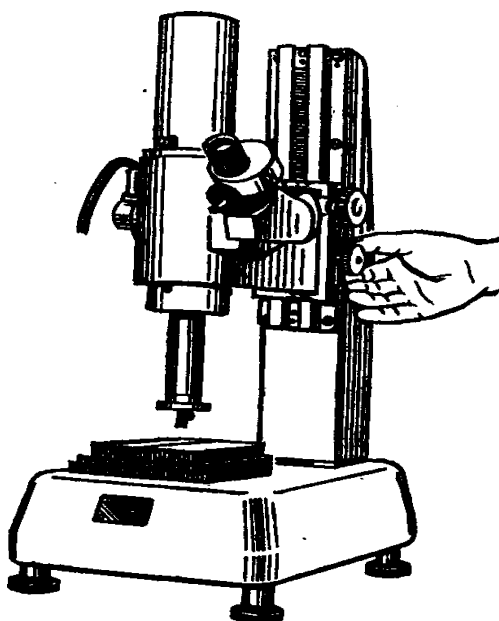
При измерении абсолютным методом (до 100 мм) надо произвести следующие действия: в зависимости от формы измеряемого изделия надо выбрать и установить измерительный наконечник; установить кронштейн по колонке в зависимости от величины измеряемого размера изделия; застопорить кронштейн; отпустить стопорный винт измерительного стержня и, поддерживая маховичок его перемещения, довести до соприкосновения измерительный наконечник со столом; наблюдая в окуляр, установить оцифрованный миллиметровый штрих посередине двойного витка спирали; убедившись в постоянстве контакта арретированием (поднятием и опусканием измерительного стержня), произвести отсчет нулевого положения; поднять измерительный стержень, и введя под него измеряемое изделие, опустить до соприкосновения измерительного наконечника с изделием; наблюдая в окуляр, установить оцифрованный миллиметровый штрих посередине двойного витка спирали; убедившись в постоянстве контакта арретированием, найти разность двух отсчетов. Для сокращения времени, уходящего на определение разности двух отсчетов, рекомендуется при измерении партии одинаковых изделий установить нулевое показание при контакте измерительного наконечника с измерительным столом.



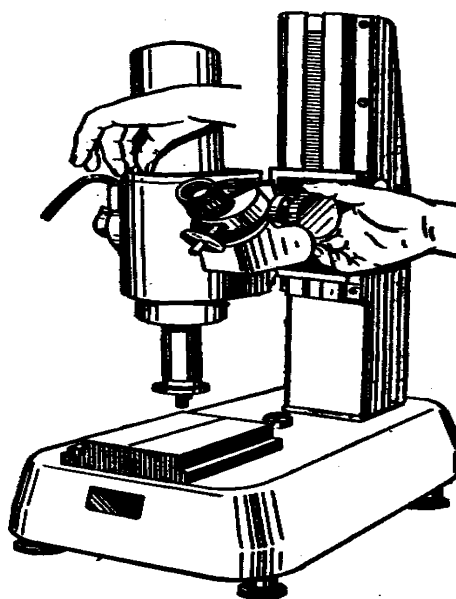
а) Установка измерительного
наконечника



б) Установка кронштейна по
колонке

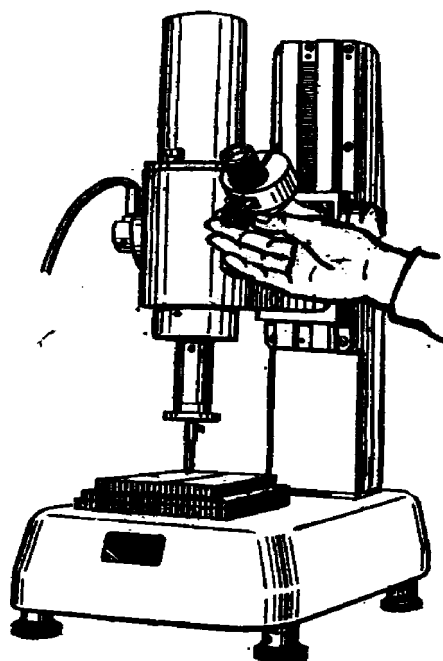


в) Закрепление кронштейна

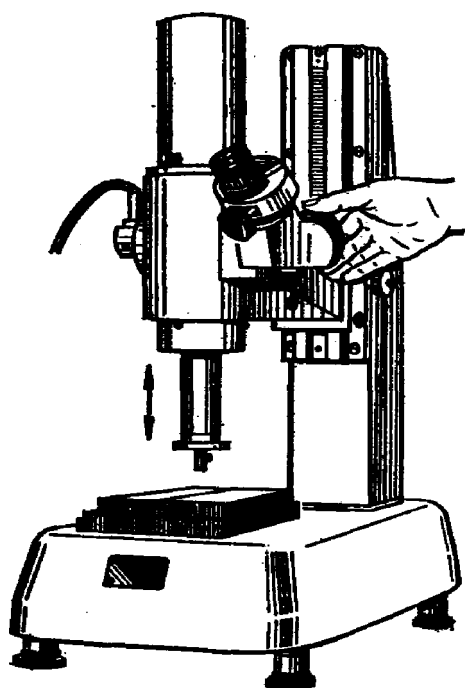


г) Освобождение стопорного винта
и доведение измерительного
наконечника до соприкосновения
со столом

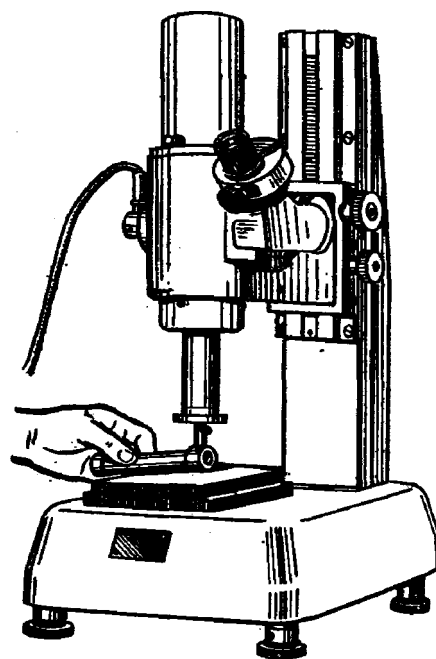
Рисунок 14.89 – Измерение абсолютным методом



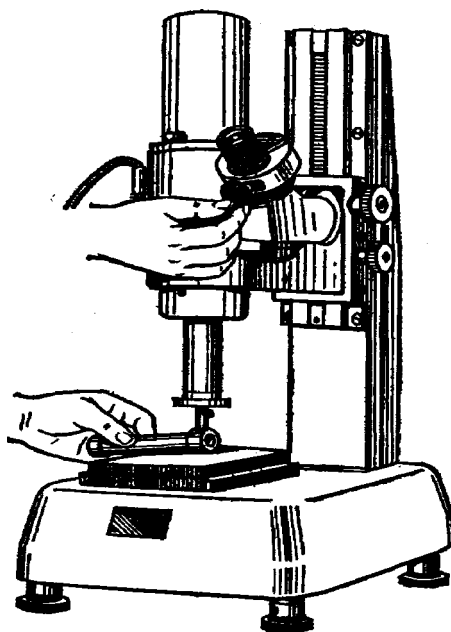
д) Установка миллиметрового штриха относительно двойного витка спирали



е) Арретирование



ж) Контактирование измерительного наконечника с изделием



з) Установка миллиметрового штриха относительно двойного витка спирали

Рисунок 14.89. лист 3

Измерение относительным методом

При относительном методе измерения (свыше 100 мм) надо установить на стол концевые меры, соответствующие номинальному размеру измеряемого размера изделия, настроить по ним прибор, затем вместо них установить измеряемое изделие, прочесть отклонение и определить размер.

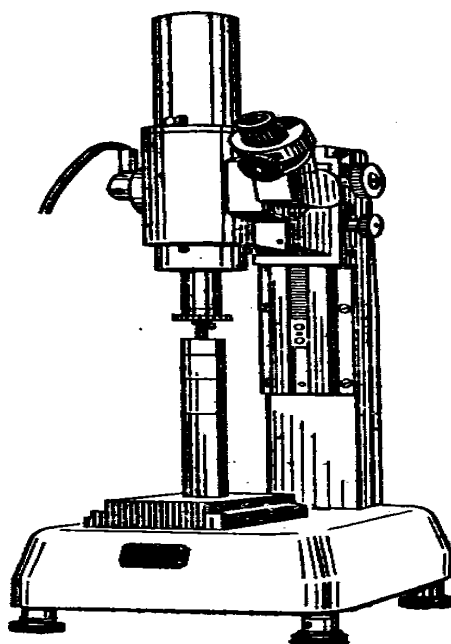


Рисунок 14.90 - Измерение относительным методом

Настройка прибора по концевым мерам

Измерительная машина ИЗМ

Измерительные машины предназначены для точных измерений наружных и внутренних линейных размеров мер и изделий непосредственно по точным линейным шкалам (абсолютным методом) или сравнением с образцовыми мерами (относительным методом).

Пределы измерения наружных размеров:

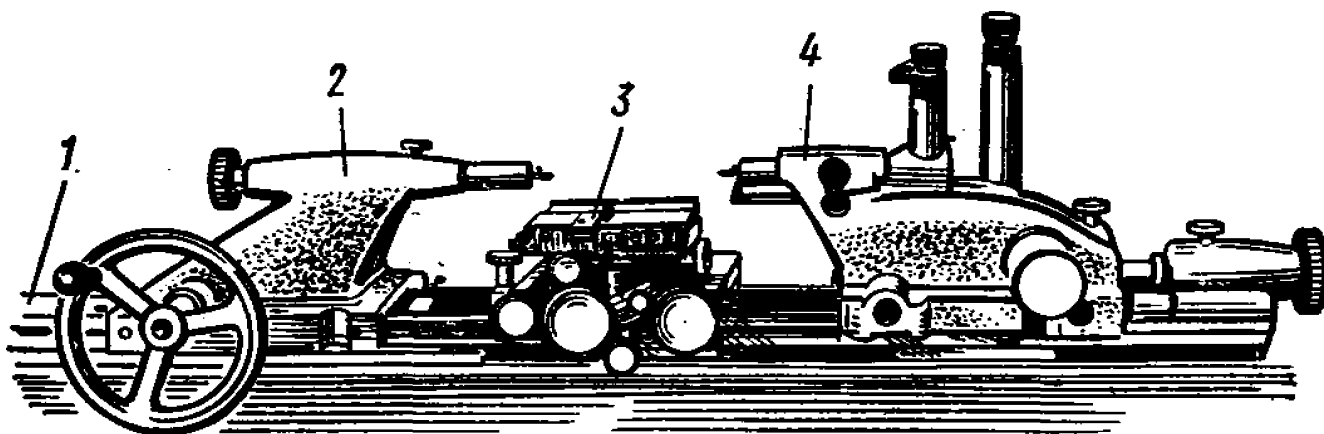
ИЗМ-1	0 — 1000 мм
ИЗМ-2	0 — 2000 мм
ИЗМ-4	0 — 4000 мм
ИЗМ-6	0 — 6000 мм

Пределы измерения внутренних размеров 13,5—150 мм

Наибольший подъем стола	50 мм

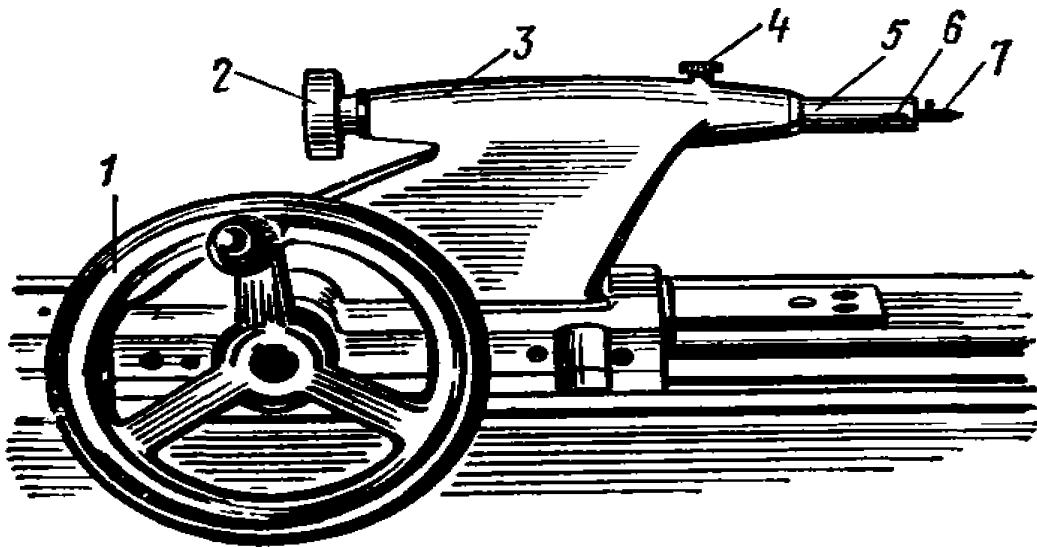
Цена деления шкал:

метровой	100 мм
стомиллиметровой	0,1 мм
Трубка оптиметра	0.001 мм
Увеличение трубки оптиметра	960.



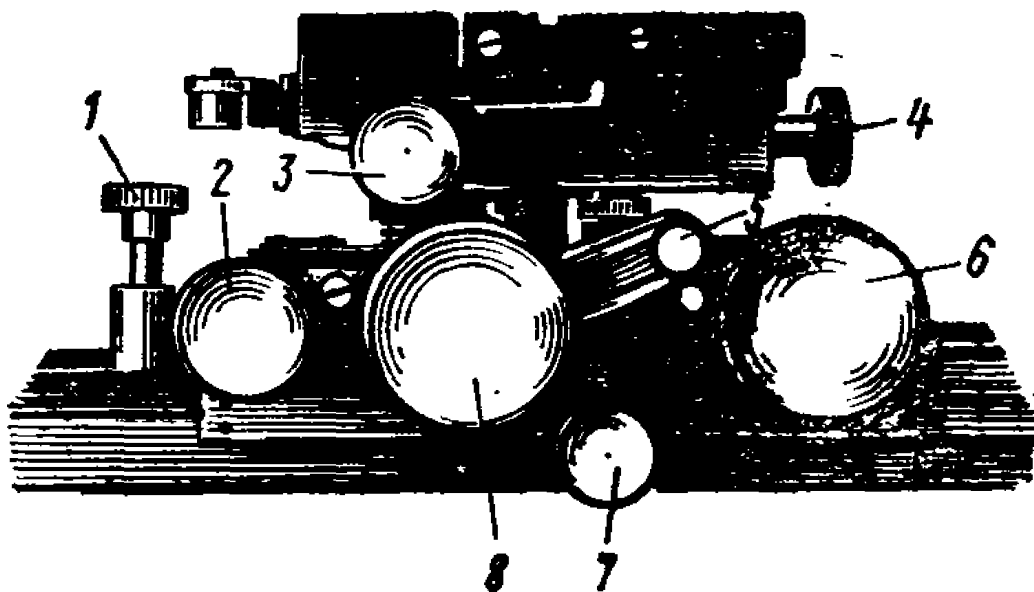
1 — станина, 2 — пинольная бабка, 3 — предметный стол,
4 — измерительная бабка

Рисунок 14.91 - Измерительная машина



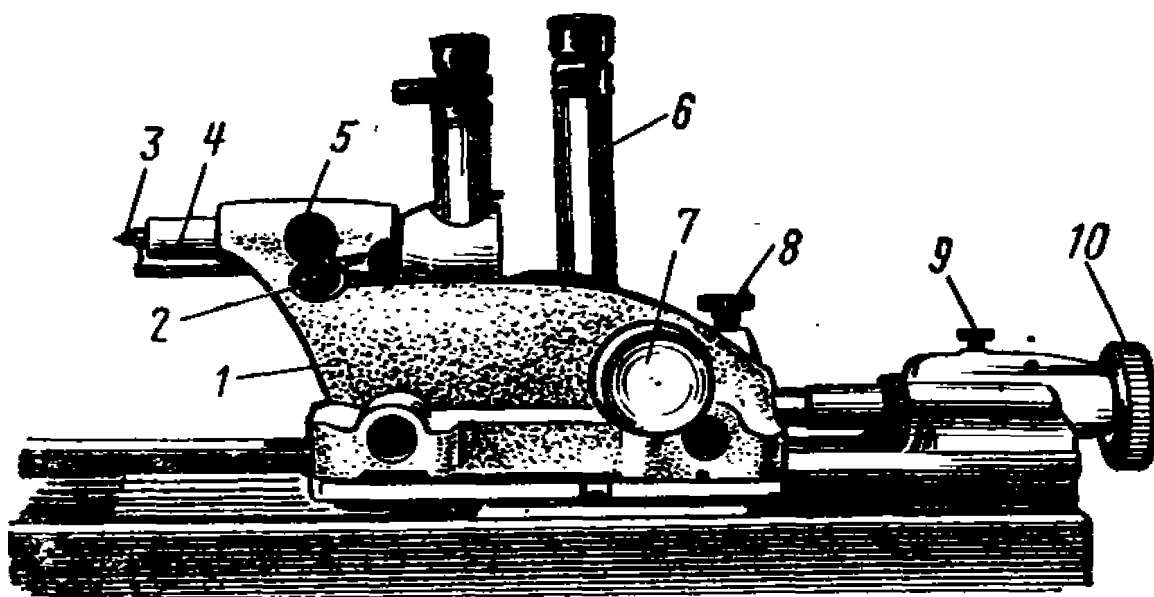
1 — маховик перемещения бабки, 2 — микроподача пиноли, 3 — корпус бабки, 4 — зажимный винт пиноли, 5 — пиноль, 6 — регулировочный винт измерительного штифта, 7 — измерительный наконечник

Рисунок 14.92 - Пинольная бабка



1 — упоры вертикального перемещения, 2 — маховичок закрепления качания вокруг горизонтальной оси, 3 — маховичок поворота вокруг вертикальной оси, 4 — маховичок горизонтального (поперечного) перемещения, 5 — винт закрепления вертикального перемещения, 6 — маховичок качания вокруг горизонтальной оси, 7 — винт закрепления стола к станине, 8 — маховичок вертикального перемещения

Рисунок 14.93 - Управление предметного стола



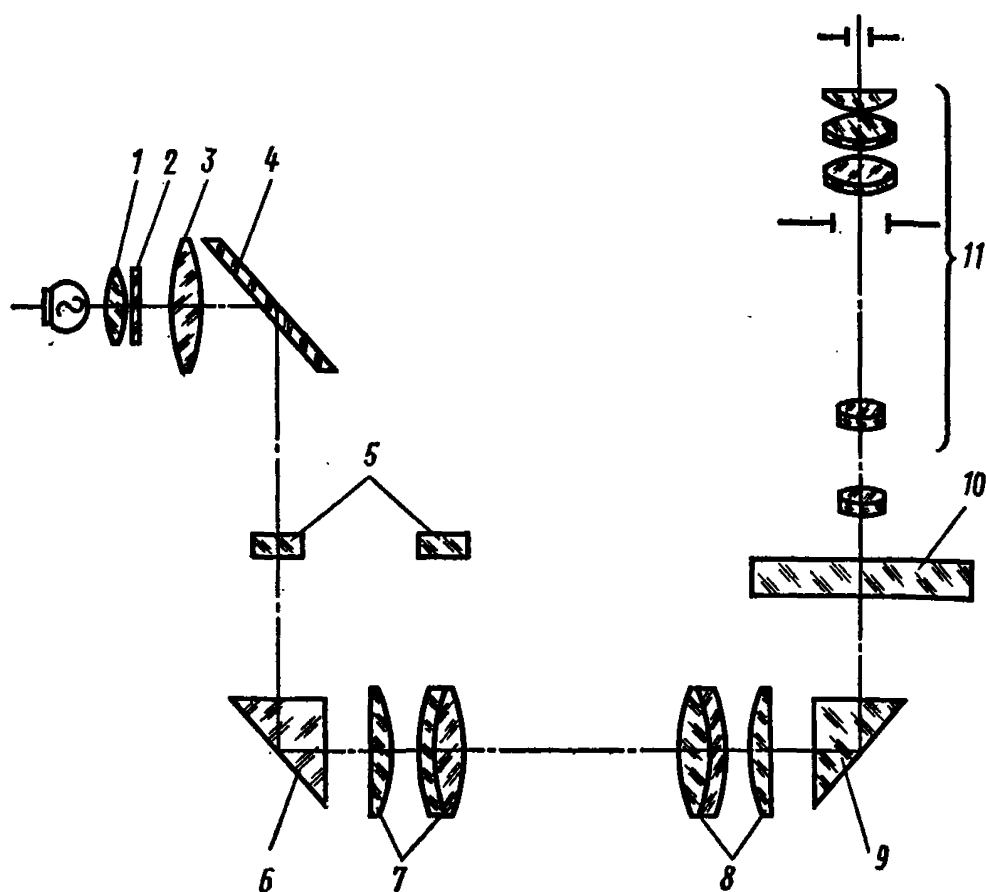
1 — корпус бабки, 2 — арретир. 3 — измерительный наконечник, 4 — трубка оптиметра, 5 — стопор трубки оптиметра, 6 — отсчетный микроскоп, 7 — маховичок перемещения бабки, 8 — стопорный винт, 9 — зажимный винт микроподачи, 10 — маховичок микроподачи

Рисунок 14.94 - Измерительная бабка

Оптическая система

Свет от лампочки проходит линзу конденсора 1, светофильтр 2, вторую линзу конденсора 3, зеркало 4 и попадает на одну из пластин 5 с двойным штрихом и цифрой, показывающей число сотен миллиметров, установленных в глазках метровой шкалы. После прохождения лучей через призму 6. объективы 7 и 8 и призму 9 в фокальной плоскости объектива 8 получается изображение двойного штриха пластины 5 и делений стомиллиметровой шкалы 10, наблюдаемые в микроскоп 11. Так как ход лучей между объективами 7 и 8 параллелен, бабки могут быть установлены в зависимости от измеряемой длины на требуемом расстоянии друг от друга, причем изображение соответствующего двойного штриха всегда будет получаться в фокусе объектива 8.

Оптическая схема представлена на рисунке 14.95.



1—первая линза конденсора, 2—светофильтр, 5—вторая линза конденсора, 4— зеркало, 5 — пластины глазков метровой шкалы, 6 — призма, 7, 8 — объективы. 9 — призма, 10 — сто миллиметровая шкала, 11 — микроскоп

Рисунок 14.95 - Оптическая система

Чтение показаний

В отсчетном микроскопе цифра над двойным штрихом показывает число сотен миллиметров, а его положение на стомиллиметровой шкале определяет десятки, единицы и десятые доли миллиметра. По трубке оптиметра определяют сотые и тысячные доли миллиметра.

Пример:

Двойной штрих 8 находится в зоне миллиметровой шкалы на восьмом штрихе после цифры 60. Осчетный индекс трубки оптиметра показывает +7,5.

Отсчет 860. 8075 мм.

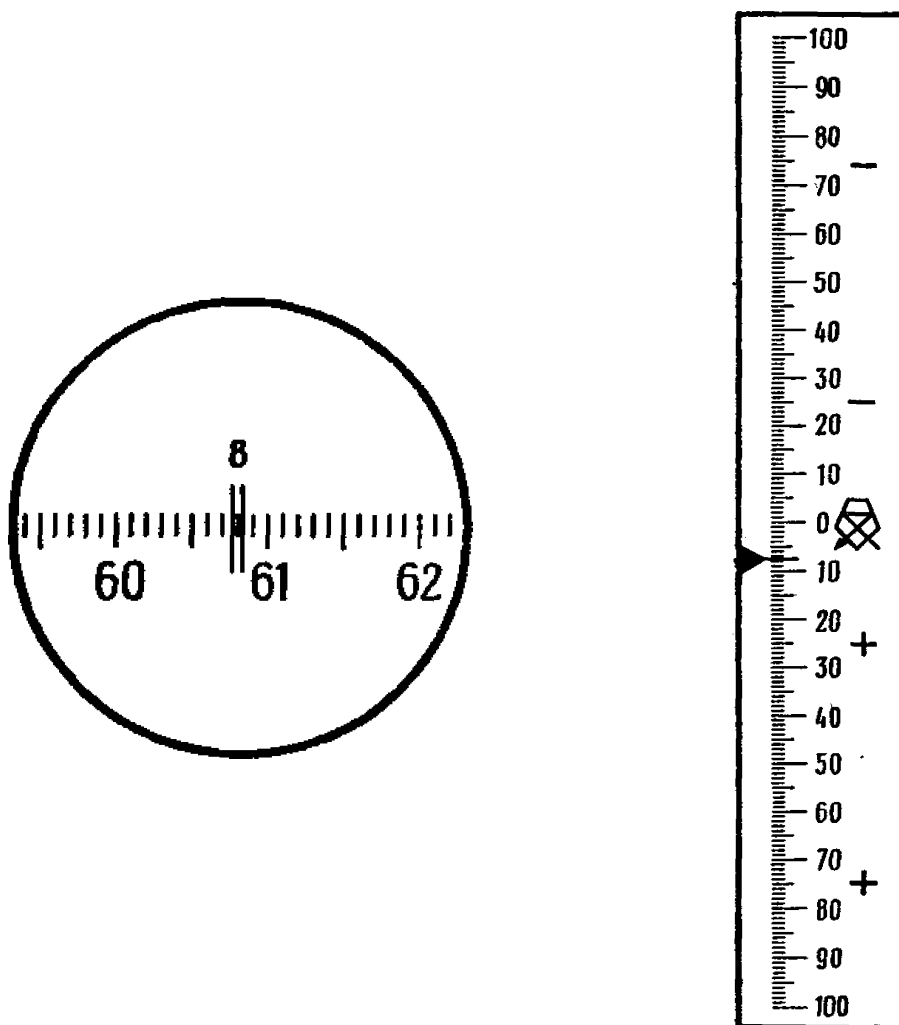


Рисунок 14.96 - Показания при измерении

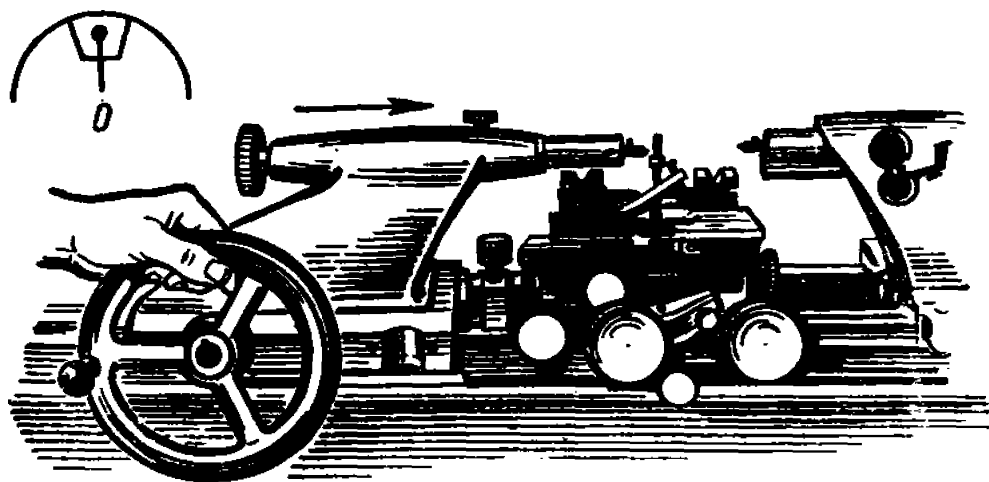
Измерение абсолютным методом

При измерении абсолютным методом надо установить машину в нулевое положение, затем установить на машину измеряемое изделие и прочесть показания.

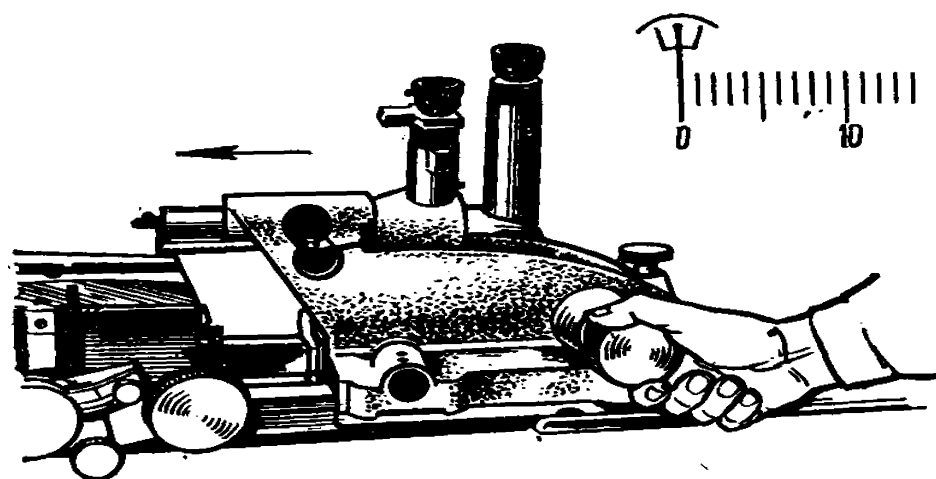
Установка машины в нулевое положение

При установке машины в нулевое положение надо произвести следующие действия: проверить температурные условия (допускается $20 \pm 1^\circ$); грубо установить пинольную бабку по наружному индексу на нуль; грубо установить измерительную бабку на нуль стомиллиметровой шкалы; застопорить измерительную бабку; микроподачей перемещать измерительную бабку до тех пор, пока нулевой штрих стомиллиметровой шкалы не будет установлен между двумя нулевыми штрихами метровой шкалы симметрично (чтобы просветы слева и справа от нулевого штриха были равны); застопорить микроподачу измерительной бабки; предварительно установить шкалу трубки оптиметра на нуль микрометрическим винтом пиноли; отрегулировать измерительный

наконечник пиноли в вертикальной плоскости и в горизонтальной плоскости; окончательно установить шкалу трубки оптиметра на нуль микрометрическим винтом; застопорить пинольную трубку.

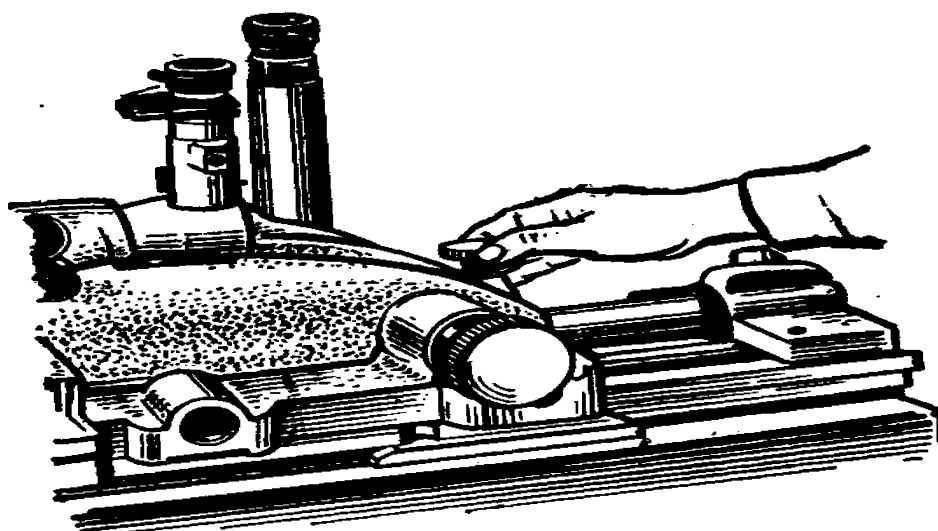


а) Грубая установка пинольной бабки на нуль

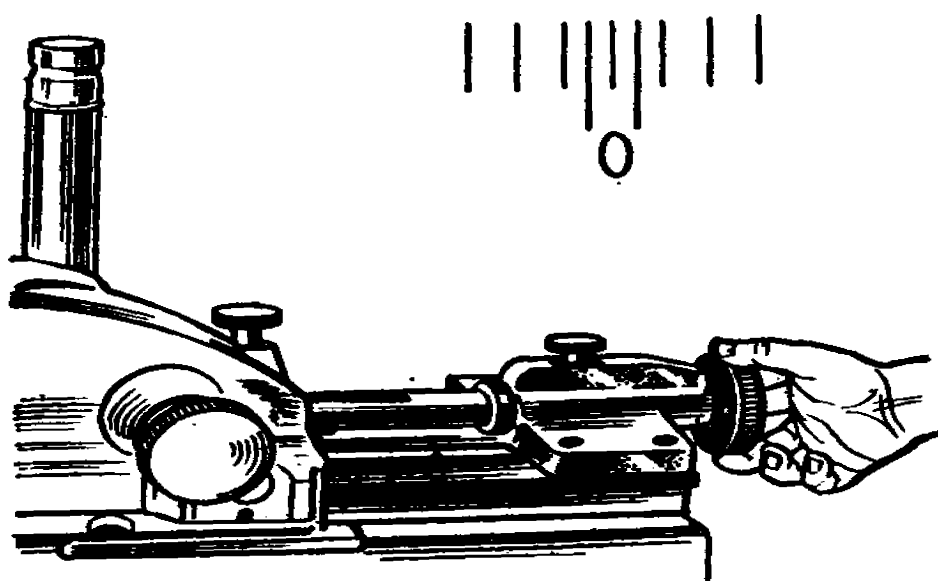


б) Грубая установка измерительной бабки на нуль

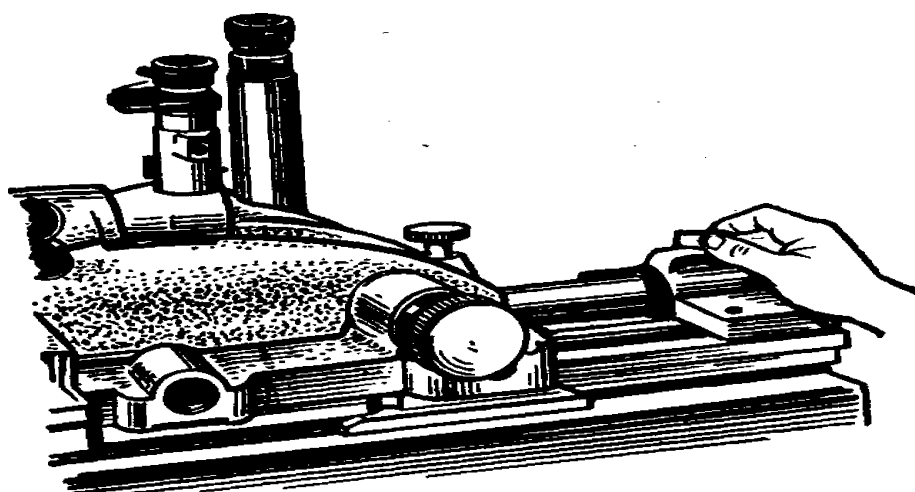
Рисунок 14.97 – Подготовка машины к измерениям



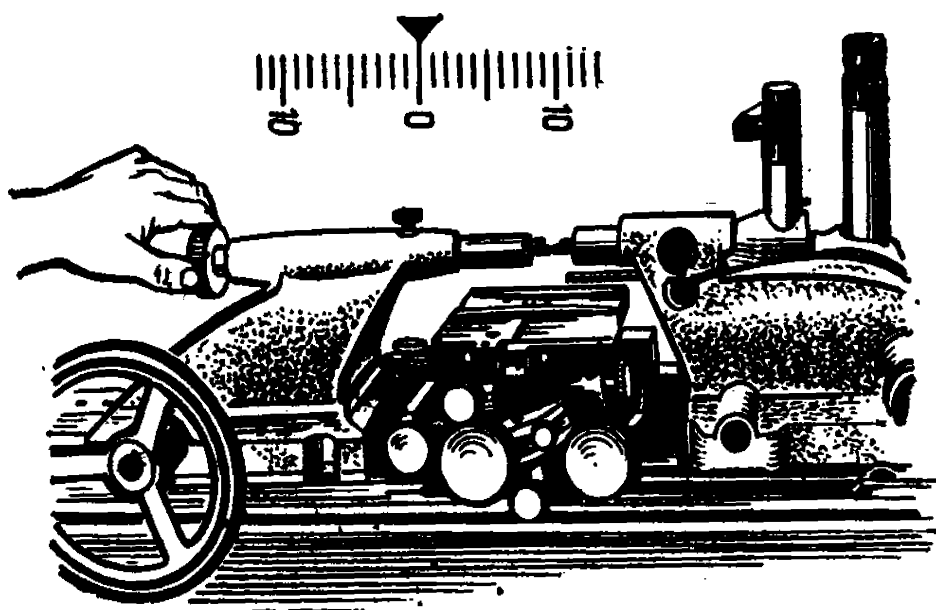
в) Стопорение измерительной балки



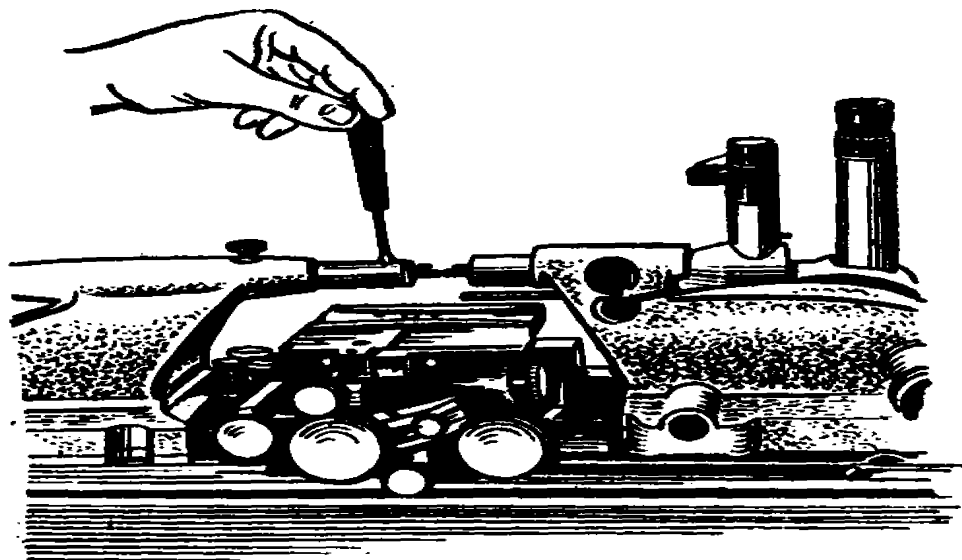
г) Установка нулевого штриха стомиллиметровой шкалы относительно нулевых штрихов метровой шкалы



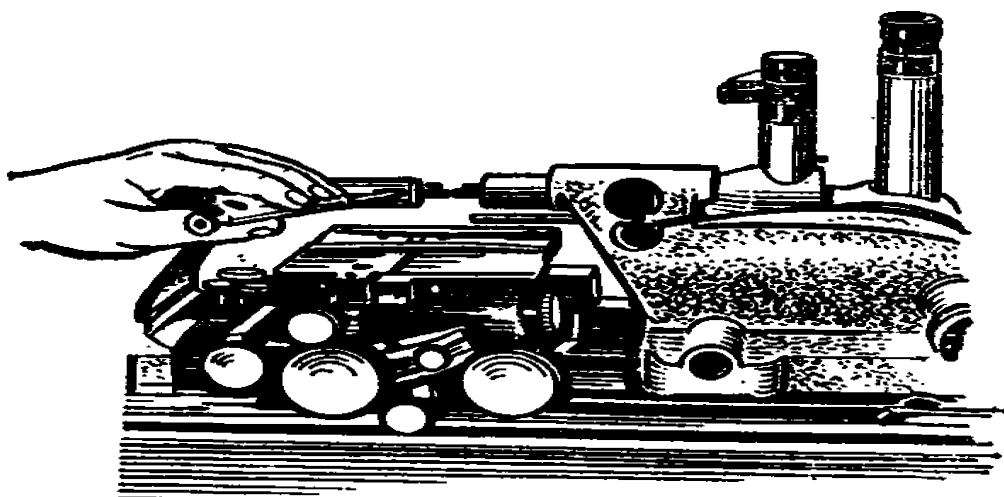
д) Стопорение микроподачи



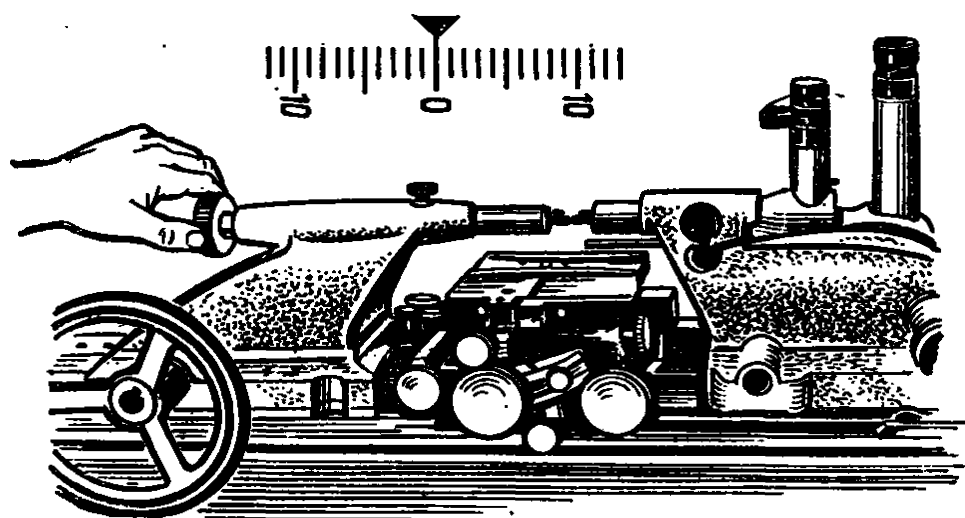
е) Предварительная установка шкалы трубки оптиметра



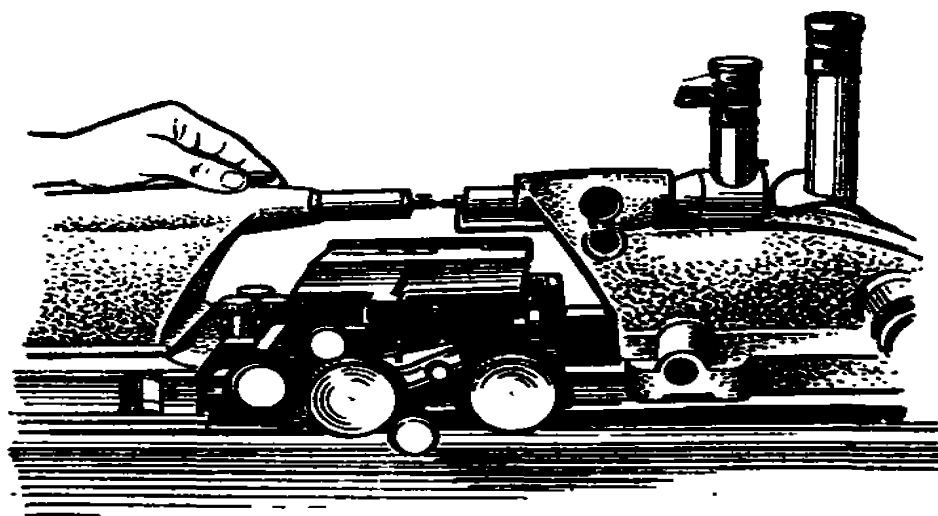
ж) Регулировка измерительного наконечника пиноли в вертикальной плоскости



з) Регулировка измерительного наконечника пиноли



и) Окончательная (после регулировки наконечника) установка шкалы трубки оптиметра на нуль



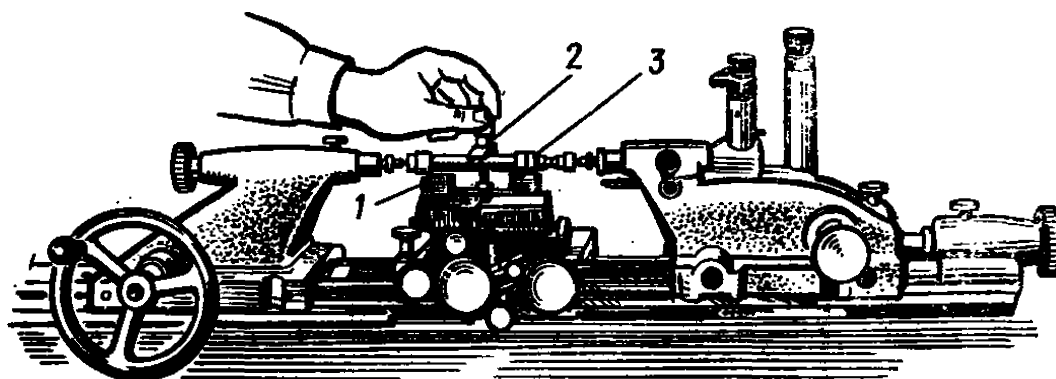
к) Стопорение пинольной трубки

Рисунок 14.97, лист 5

Установка измеряемого изделия и отсчет

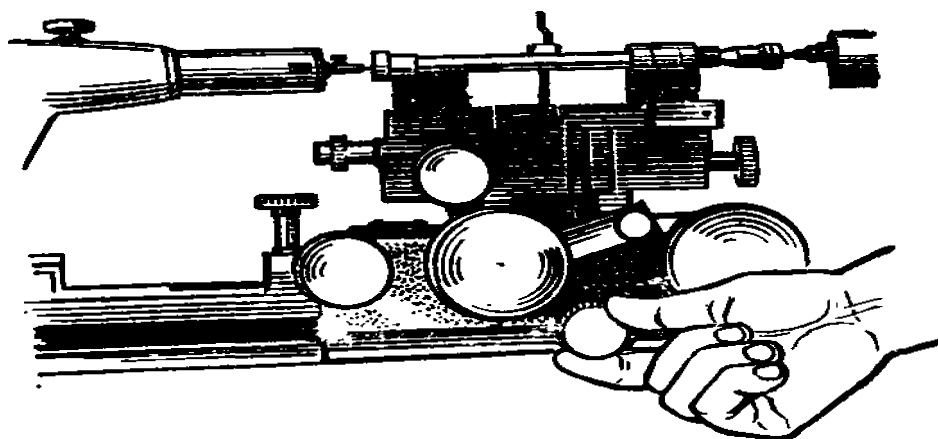
При установке измеряемого изделия на столе машины надо произвести следующие действия: закрепить изделие на призмах струбиной; прикрепить стол к станине; переместить стол с изделием в вертикальном направлении до ввода его на линию измерения и застопорить; переместить стол с изделием в горизонтальном поперечном направлении до ввода его на линию измерения;

покачиванием вокруг вертикальной оси выверить по линии измерения в горизонтальной плоскости; покачиванием вокруг горизонтальной оси, лежащей на линии измерения, совместить ось изделия с линией измерения в вертикальной плоскости; застопорить стол в этом положении; прочесть показания в отсчетном микроскопе (1), оптиметровой трубке (11) и определить результаты измерения.



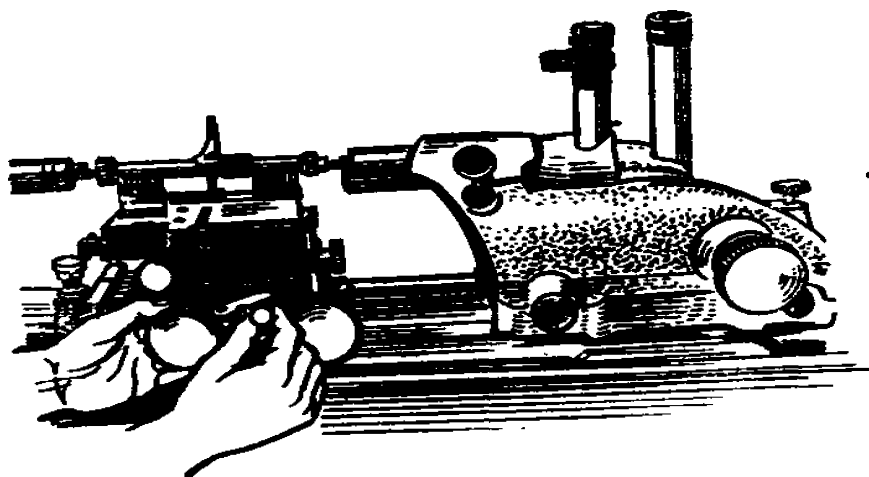
1 — призма. 2—струбцина, 3 — изделие

а) Закрепление изделия

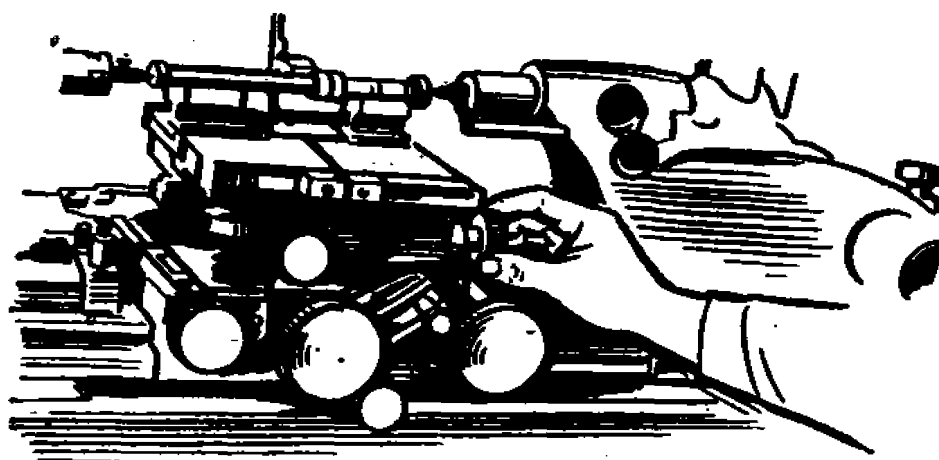


б) Закрепление стола на станине

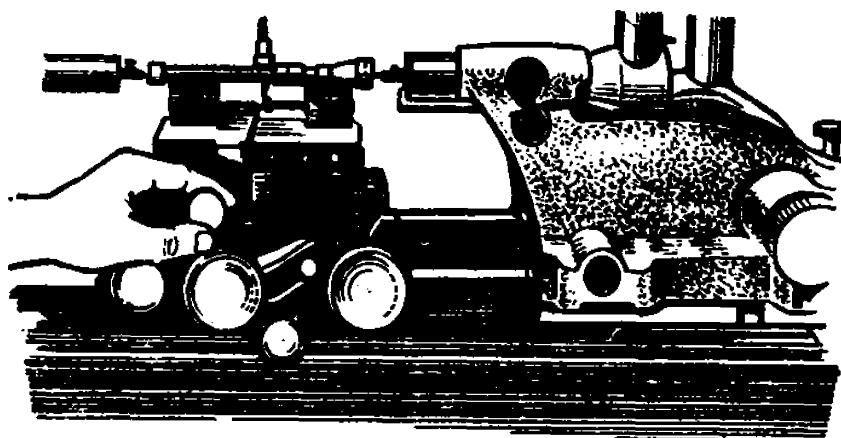
Рисунок 14.98 - Измерение абсолютным методом на измерительной машине



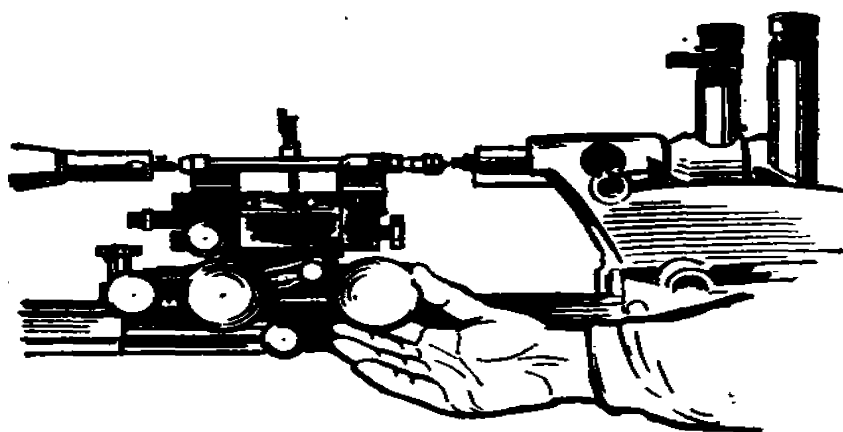
в) Перемещение и стопорение стола в вертикальном направлении



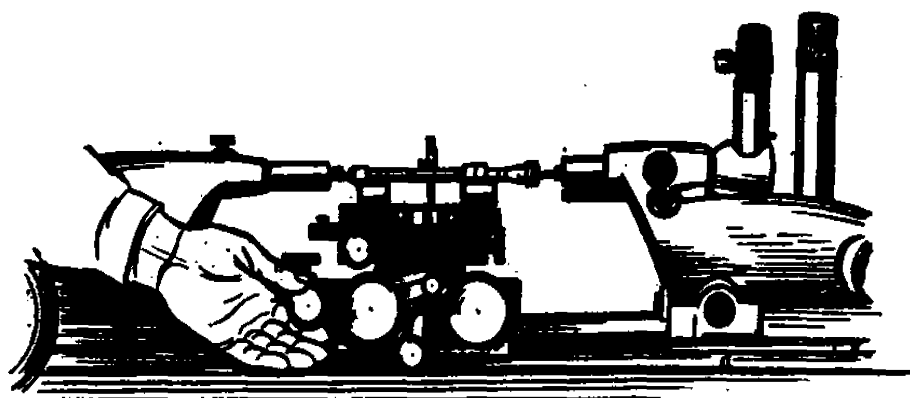
г) Перемещение стола в поперечном направлении



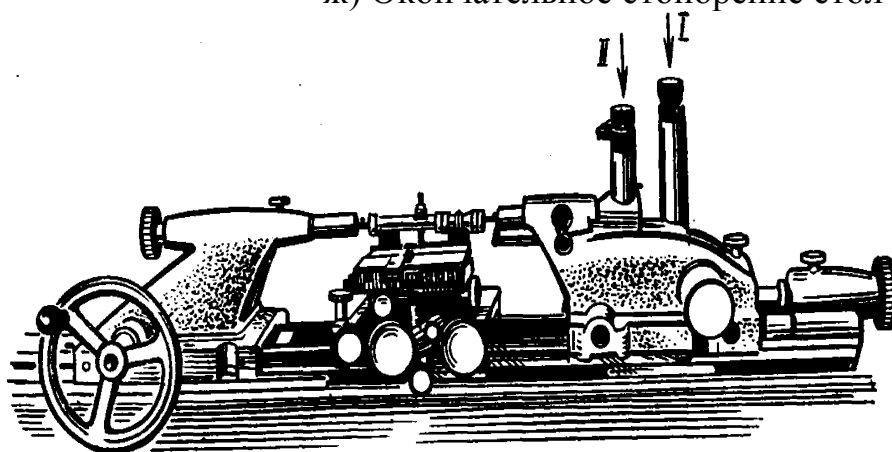
д) Покачивание стола вокруг вертикальной оси
Рисунок 14.98, лист 2



е) Покачивание стола вокруг горизонтальной оси



ж) Окончательное стопорение стол



з) Чтение показаний
Рисунок 14.98, лист 3

Измерение относительным методом

При измерении относительным методом установка машины на нуль не требуется и пользуются только трубкой оптиметра, по которой определяют отклонения от исходной меры.

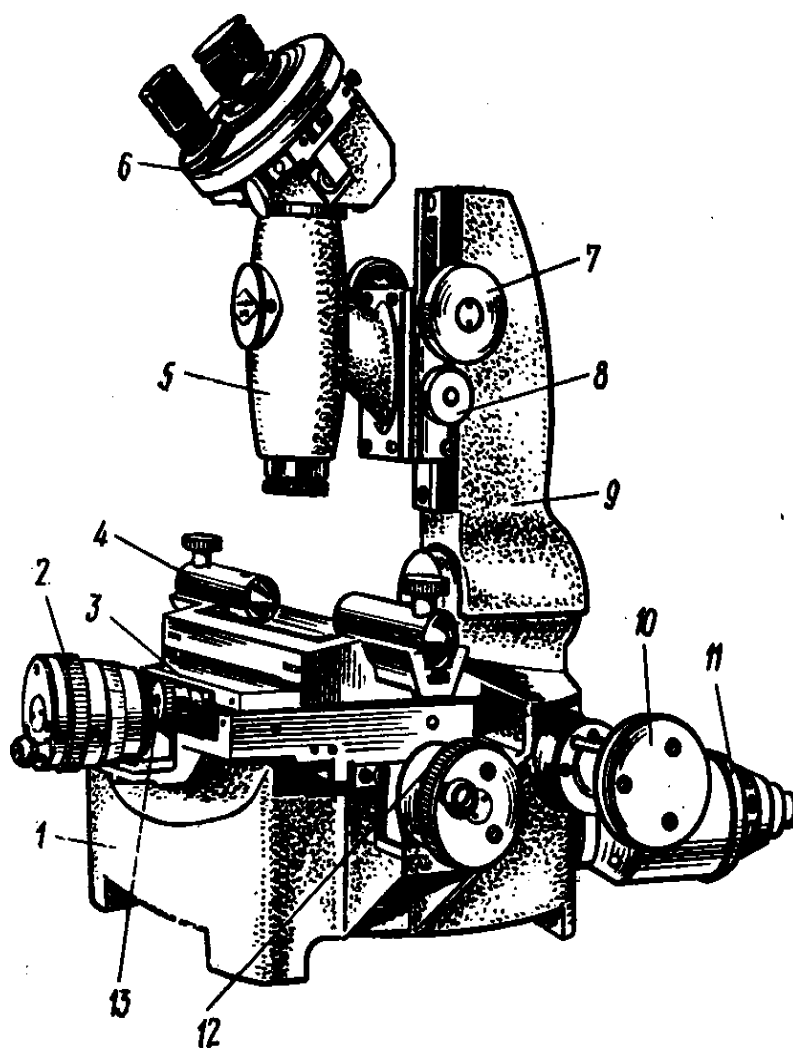
Инструментальные микроскопы

Инструментальные микроскопы предназначены для измерения длин углов, элементов резьб, конусов и различных профилей.

Инструментальные микроскопы разделяются на малые — ММИ и большие — БМИ.

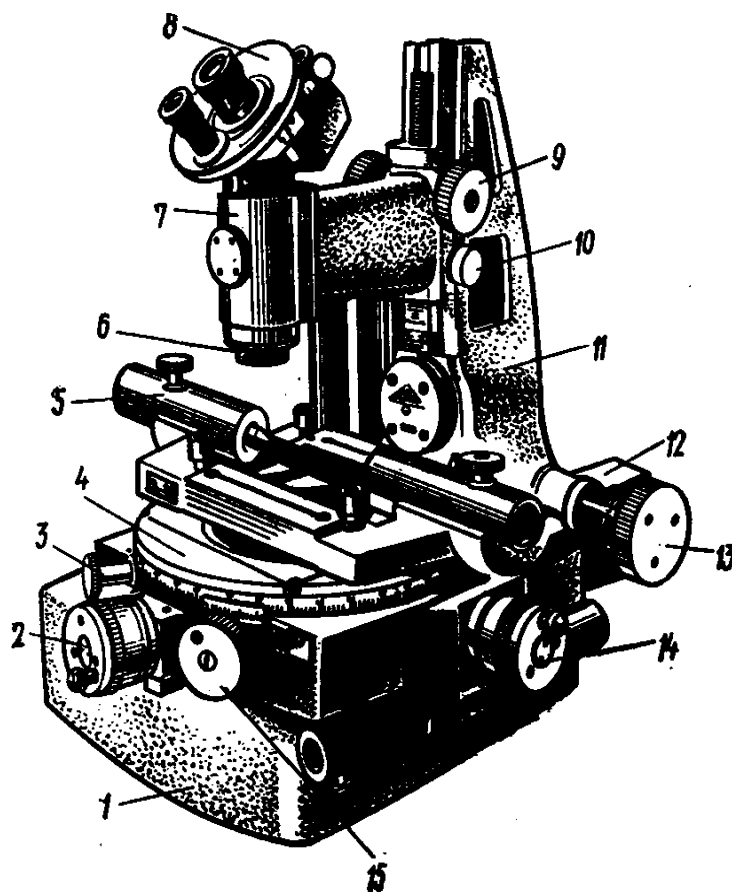
Пределы измерения:

в продольном направлении для малой модели	0—75 мм
» для большой модели	0—150 мм
поперечном направлении для малой модели	0—25 мм
» для большой модели	0—50 мм
Пределы перемещения микрометрических винтов	0—25 мм
Цена деления микрометрического устройства	0.005 мм
Увеличение микроскопа	10^x — 50^x
Поле зрения	4,2—21 мм
Пределы измерения угловых размеров	0—360°
Цена деления окулярной угломерной головки	1'
Увеличение отсчетного устройства угловой шкалы	45^x
Поворот предметного стола:	
для малой модели	$\pm 5^\circ$
для большой модели	360° с ценой деления 3'
Пределы наклона колонки:	
для малой модели	$\pm 10^\circ$
для большой модели	$\pm 12^\circ 30'$



1 — основание, 2 — микрометрическое устройство поперечной подачи, 3 — предметный стол, 4 — центровая бабка, 5 — кронштейн, 6 — штриховая окулярная головка с отсчетным микроскопом угловой шкалы, 7 — кремальера перемещения кронштейна, 8 — тормоз кронштейна. 9 — колонка, 10 — маховик наклона колонки, 11—осветитель, 12— микрометрическое устройство продольной подачи, 13— винт поворота верхней плиты стола

Рисунок 14.99 - Микроскоп малый ММИ



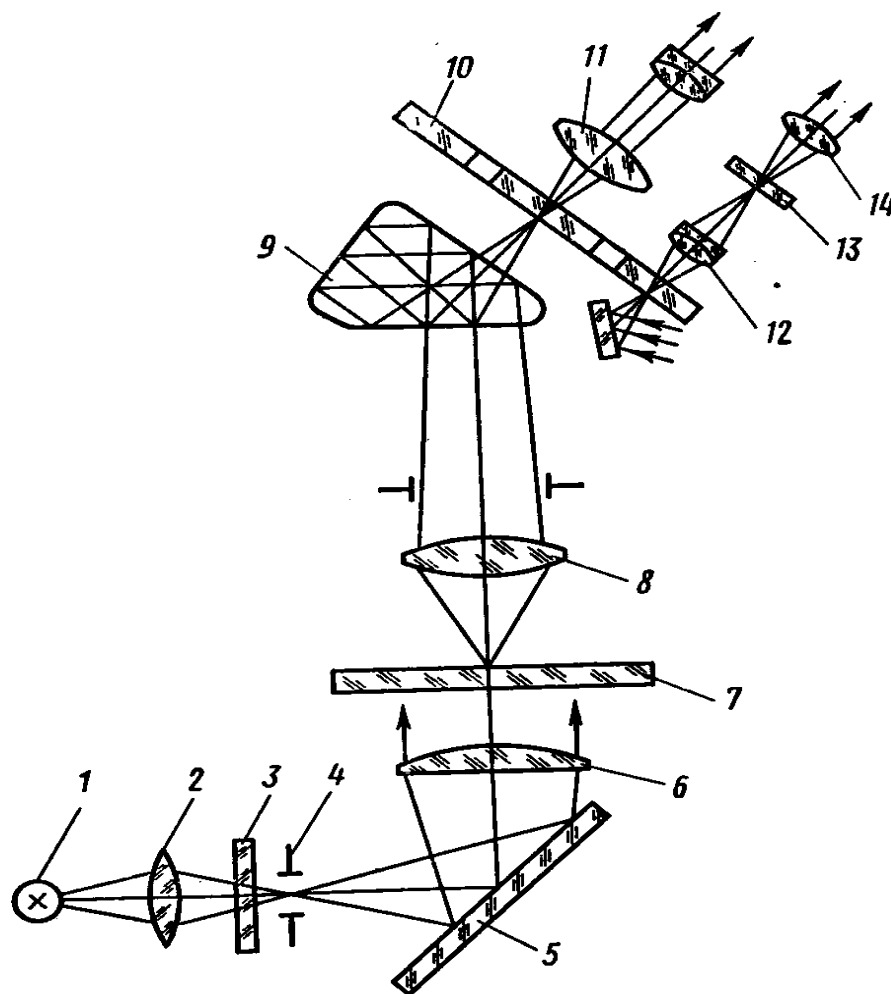
1 — основание, 2 — микрометрическое устройство поперечной подачи, 3 — рукоятка крепления стола, 4 — круглый предметный стол, 5 — центровая бабка, 6 — кольцо фокусировки тубуса. 7 — кронштейн с тубусом, 8 — штриховая окулярная головка с отсчетным микроскопом угловой шкалы, 9 — кремальера перемещения кронштейна. 10 — тормоз кронштейна, 11 — колонка, 12 — осветитель, 13 — маховик наклона колонки, 14 — микрометрическое устройство продольной подачи, 15 — маховик поворота стола.

Рисунок 14.100 - Микроскоп большой БМИ

Принципиальная оптическая схема инструментального микроскопа

Лучи света от лампы накаливания 1, пройдя через линзу конденсора 2, светофильтр 3 и диафрагму 4, отражаются от поворотного зеркала 5 и через линзу 6 освещают измеряемый объект, помещенный на предметном столе 7 или закрепленный в центровых бабках. Изображение объекта измерения проектируется объективом 8 в фокальную плоскость окуляра 11, где помещается штриховая сетка 10 и жестко связанный с ней круговой лимб. Между объективом 8 и лимбом 10 для излома хода лучей помещена призма 9. Изображение объекта измерения рассматривается через окуляр 11. Отсчет по

градусной шкале производится с помощью отсчетного микроскопа 12. В фокальной плоскости окуляра 14 находится минутная шкала 13.



1 — лампа накаливания, 2 — линза конденсора, 3 — светофильтр, 4 — диафрагма. 5 — поворотное зеркало, 6 — линза. 7 — предметный стол, 8 — объектив, 9 — система призм, 10 — штриховая сетка с круговым лимбом, 11 — окуляр, 12 — отсчетный микроскоп, 13 — минутная шкала, 14 — окуляр

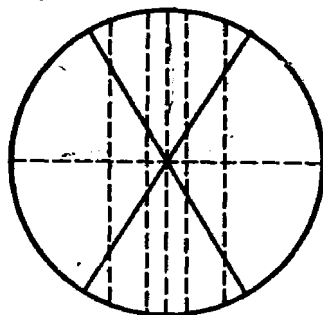
Рисунок 14.101 - Принципиальная схема микроскопа

Чтение показаний

Внутри корпуса головки имеется стеклянная пластина со штриховой сеткой и лимб, разделенный по окружности на 360 равных частей. Пластина со штриховой сеткой и лимб градусной шкалы жестко связаны между собой и имеют общий центр вращения, который находится на оптической оси микроскопа. Штриховая сетка (рисунок 14.102) наблюдается в центральный окуляр микроскопа, а градусная и минутная шкалы—в отсчетный угломерный микроскоп.

При линейных измерениях после установки штриховой сетки в нулевое положение производится установка измеряемого изделия таким образом, чтобы одна из его сторон, от которой производится измерение, совпадала с какой-либо штриховой линией сетки и при этом производится первый отсчет по микрометрическому устройству. Затем изделие с предметным столом

перемещается до совпадения его второй стороны, до которой производится измерение, с этой же штриховой линией сетки и вторично производится отсчет по микрометрическому устройству. Разность в отсчетах является результатом измерения.



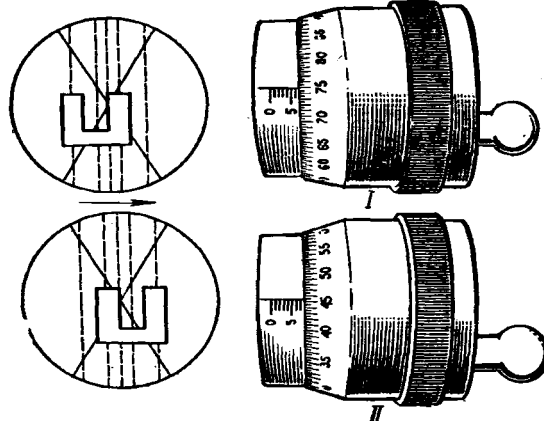
Рисунок

14.102 - Штриховая сетка

При угловых измерениях изделие устанавливается таким образом, чтобы одна образующая его угла совпадала с центральной штриховой линией сетки при совпадении вершины угла с оптической осью микроскопа. При этом в отсчетном угломерном микроскопе производится первый отсчет (желательно, чтобы он был равен нулю). Затем поворачивается штриховая сетка до совпадения ее центральной штриховой линии со второй образующей угла изделия и производится второй отсчет. Если первый отсчет равнялся нулю, то второй будет являться результатом измерения. Если первый отсчет не равнялся нулю, то надо вычесть его величину от второго отсчета и получить результат измерения.

Пример:

а)



Проекция изделия на
штриховой сетке

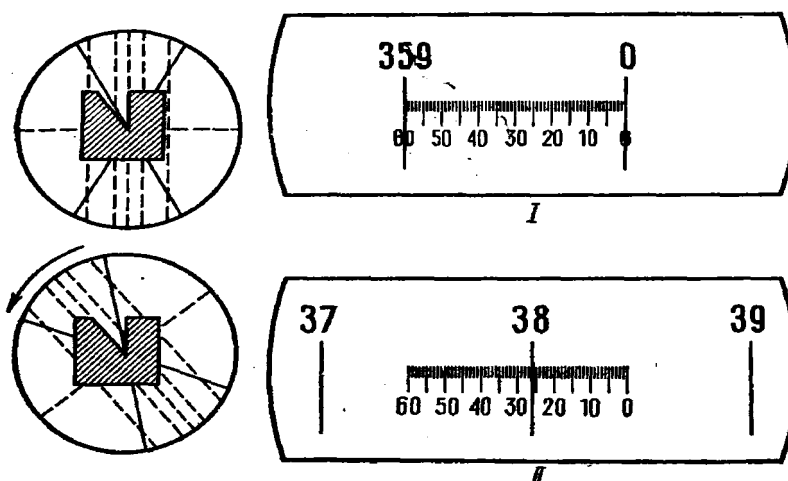
Показания:

I — 6.75 мм, *II* — 7.455 мм

Результат измерения: 7,455 мм — 6.75 мм " 0.705 мм

Рисунок 14.103 - Чтение показаний

б)



Проекция углового
изделия на штриховой
сетке

Показания:
I—0; II—38°26'

Результат измерения: 38°36'

Рисунок 14.103, лист 2

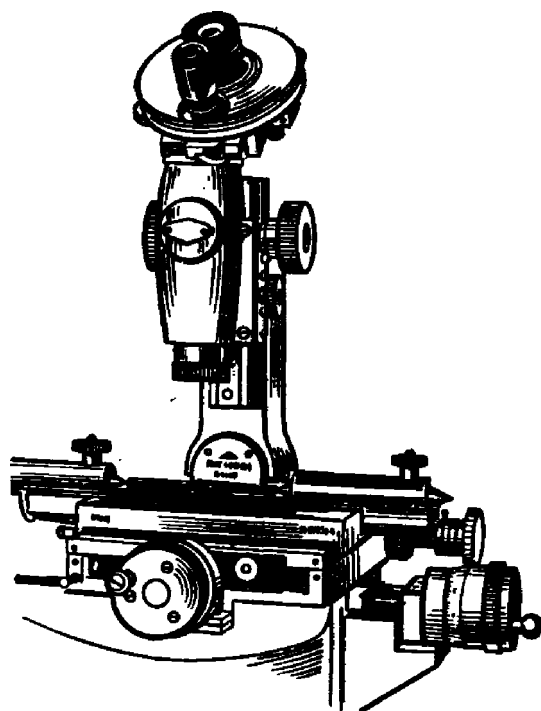
Подготовка к измерениям на малом инструментальном микроскопе

Перед измерением надо выбрать и установить сменный объектив, а затем проверить и отрегулировать микроскоп по контрольному валику.

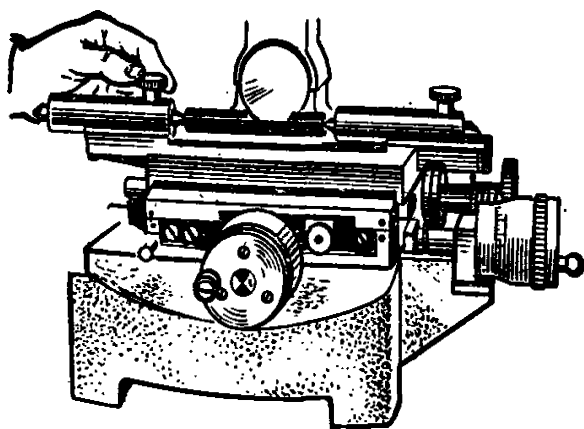
Сменные объективы, дающие различное увеличение, следует выбирать в зависимости от необходимой величины поля зрения — диаметра рассматриваемого круга. При всех других равных условиях рекомендуется пользоваться возможно большим увеличением.

Контрольный валик предназначен для фокусировки микроскопа на горизонтальную плоскость, совпадающую с линией центров бабки, для установки линии центров параллельно продольному ходу стола, а также для проверки совпадения линии центров с осью вращения колонки.

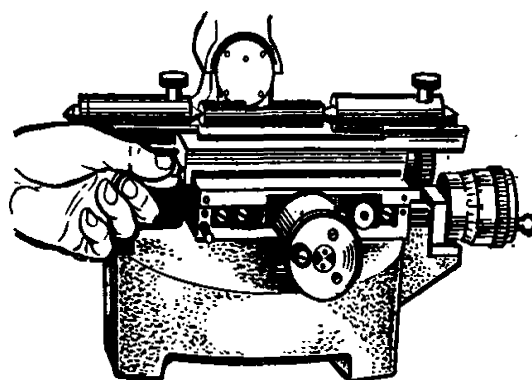
После установки и закрепления контрольного валика в центровых бабках надо приблизительно установить и закрепить центровые бабки с рамкой на верхней плите предметного стола относительно оптической оси микроскопа, установить кронштейн с микроскопом на резкость, застопорить кронштейн, произвести точную установку контрольного валика одновременно микровинтами поперечного хода и продольного хода и проверить параллельность линии центров продольному ходу стола. При не параллельности линии центров продольному ходу стола надо выровнять верхнюю плиту стола и проверить, добиваясь параллельности.



а) Установка сменного объектива

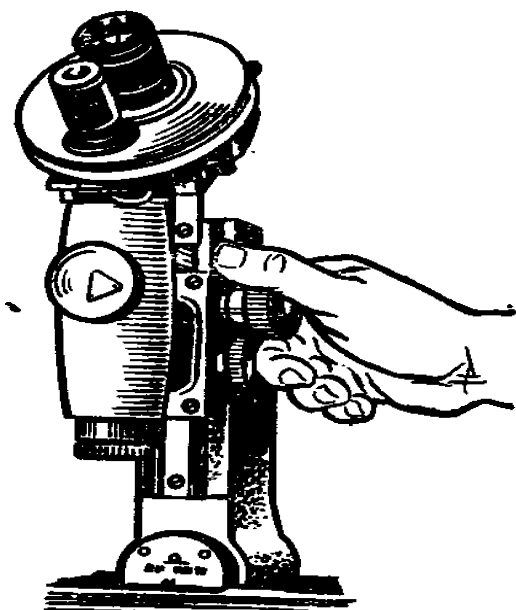


б) Установка и закрепление контрольного

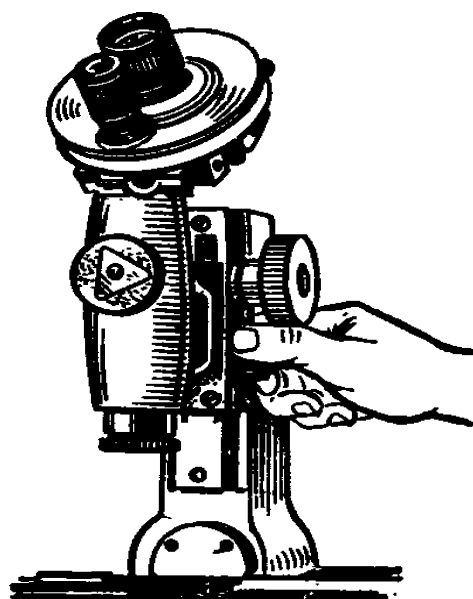


в) Установка и закрепление
центровых валика
бабок на верхней плите
предметного столика

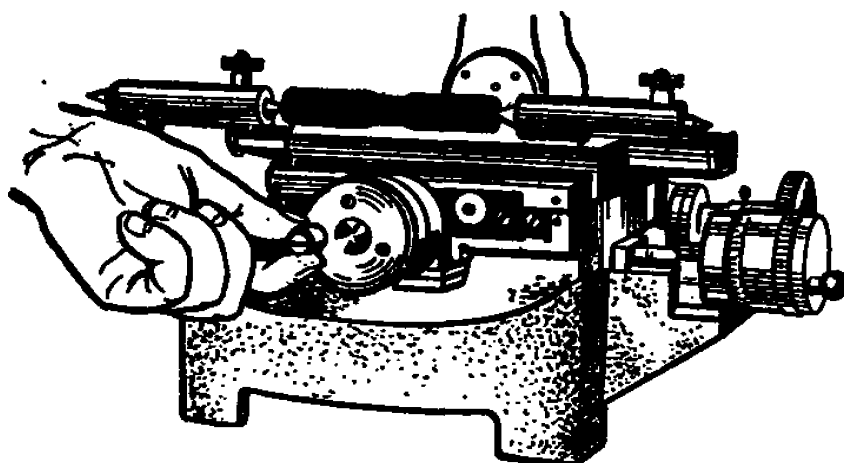
Рисунок 14.104 – Подготовка измерения на микроскопе



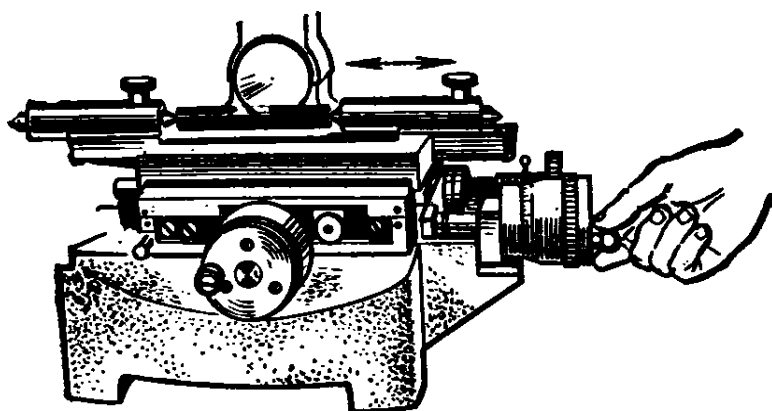
г) Установка микроскопа на резкость



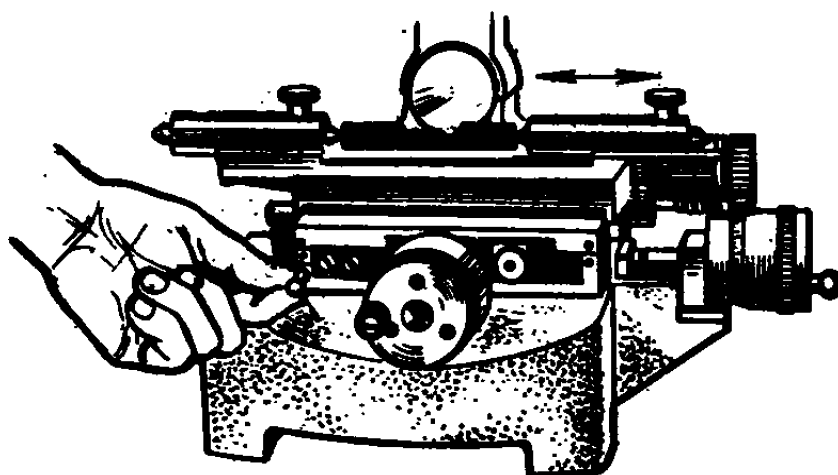
д) Стопорение кронштейна



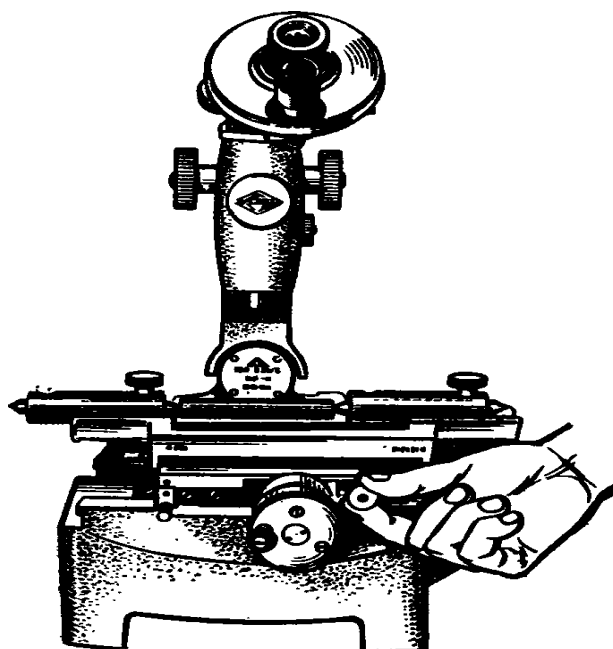
е) Микроподача поперечного хода стола



ж) Микроподача продольного хода стола



з) Быстрое перемещение продольного стола



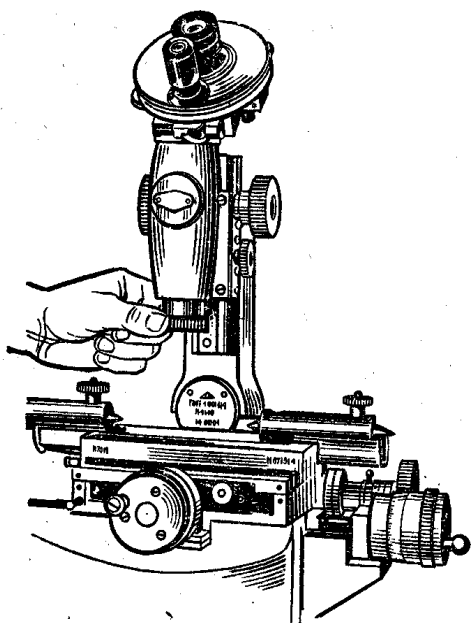
и) Выравнивание верхней плиты стола

Рисунок 14.104, лист 3

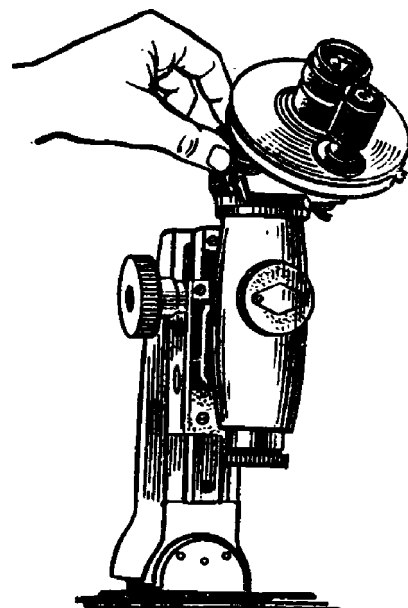
Измерение угла уклона косинуса косвенным (тригонометрическим методом)

После установки конусного изделия в центовые бабки следует сфокусировать и совместить горизонтальный штрих сетки с образующей конуса и произвести первый отсчет перекрестия сетки по микрометрическому устройству в поперечном направлении, затем переместить предметный стол в продольном направлении на определенную длину микровинтом или применяя плоскопараллельные концевые меры, вторично совместить перекрытие штриховой сетки в поперечном направлении с образующей конуса и

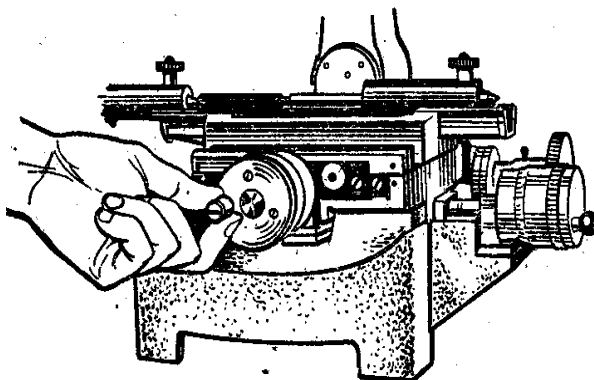
произвести вторичный отсчет, а затем определить вычислением тангенс угла наклона и по таблице – угол уклона.



а) Установка конусного изделия в центровые бабки

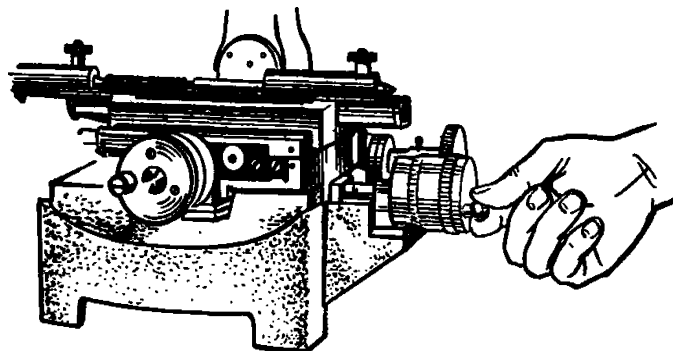


б) Поворот штриховой сетки

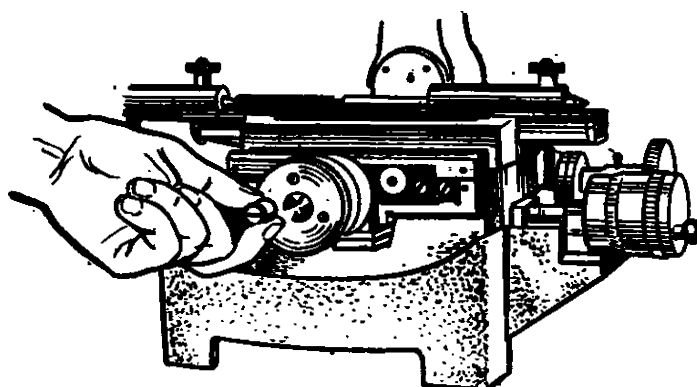


в) Доведение образующей конуса с перекрестием штриховой сетки в поперечном направлении

Рисунок 14.105 – Измерение угла уклона косинуса



г) Продольное перемещение стола микроподачей



д) Вторичное доведение образующей конуса с перекрестием штриховой сетки в поперечном направлении

Рисунок 14.105, лист 2

Пример

Для предостережения от погрешности, из-за возможного перекоса осей изделия и измерения, рекомендуется при измерении угла конуса провести аналогичное измерение на противоположной стороне его образующей и подсчитать среднее арифметическое результатов измерения.

Помимо тригонометрического метода можно также определить угол уклона конуса непосредственно по отсчетному микроскопу угловой шкалы, прочитав показания после поворота штриховой сетки и совпадения ее продольного штриха с образующей конуса.

Схема уклона конуса тригонометрическим методом: $d_I = 0,98$ мм; $d_{II} = 11,48$ мм; $l = 20$ мм; $a = d_{II} - d_I = 11,48$ мм — $10,98$ мм = $0,5$ мм; $\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{l} = \frac{0,5}{20} = 0,025$; $\alpha = 1^\circ 25'$

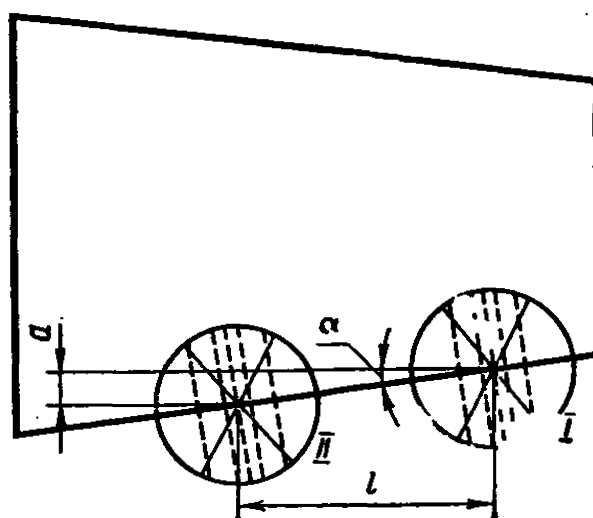


Рисунок 14.106 - Схема уклона конуса тригонометрическим методом

Измерение среднего диаметра резьбы

Для измерения среднего диаметра резьбы изделие, закрепленное в центрах, устанавливают параллельно продольному ходу стола. Для этого с помощью микровинта поперечной подачи совмещают горизонтальную штриховую линию сетки окулярной головки с изображением вершин профиля резьбы и проверяют совмещение по всей длине, перемещая стол в продольном направлении. Для получения резкого изображения резьбового профиля наклоняют колонку на угол, равный углу подъема резьбы изделия. Затем совмещают центральную штриховую линию сетки с изображением стороны профиля резьбы, действуя при этом микровинтами поперечной и продольной подачи, таким образом, чтобы штриховая линия, перпендикулярная центральной линии, делила измеряемую сторону профиля резьбы примерно пополам. Произведя отсчет по микрометрическому устройству поперечной подачи, перемещают стол с изделием в поперечном направлении до появления диаметрально противоположной параллельной стороны профиля резьбы. Наклонив колонку на тот же угол, но в противоположную сторону, снова совмещают центральную штриховую линию со стороной профиля резьбы и производят вторичный отсчет. Разность между отсчетами является средним диаметром резьбы, измеренным по одной стороне профиля.

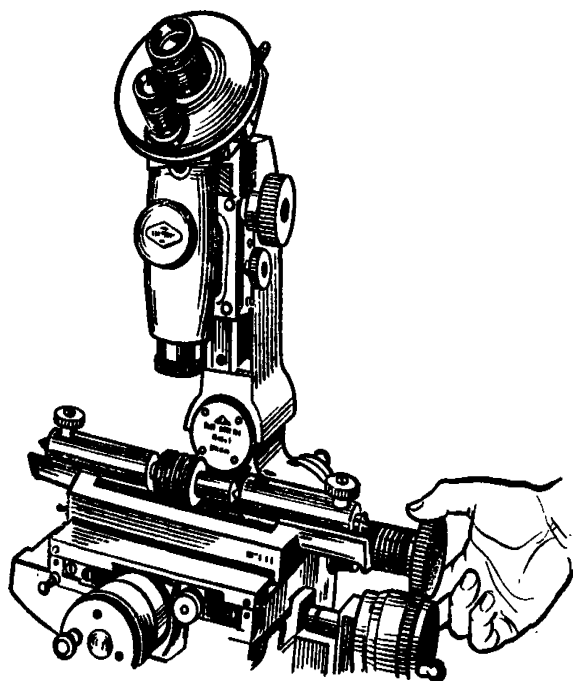


Рисунок 14.106 - Наклон колонки на угол подъема резьбы

Пример

Для предостережения от погрешности, из-за возможного перекоса осей изделия и измерения, рекомендуется при измерении среднего диаметра резьбы произвести аналогичное измерение по другой стороне профиля и подсчитать среднее арифметическое результатов измерения. Схема измерения среднего диаметра резьбы по одной стороне профиля: $d_1 = 34,469$ мм, $d_{11} = 62,520$ мм, $D = 62,520$ мм - $37,469$ мм = $25,051$ мм.

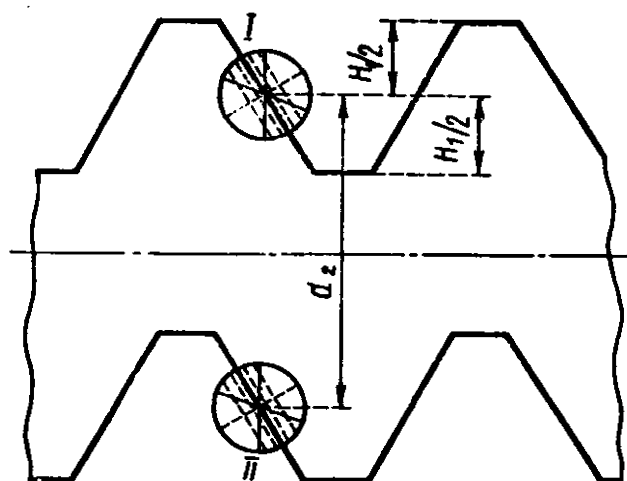


Рисунок 14.107 – Схема измерения среднего диаметра резьбы

Измерение угла профиля и шага резьбы

В процессе измерений, для того, чтобы можно было судить не только о величине угла, но и наклоне профиля к оси резьбы, измерения рекомендуется производить по половинам угла, совмещая штриховую линию сетки поочередно с правой и левой сторонами профиля. Сумма результатов измерения является величиной угла профиля, а их равенство показывает перпендикулярность биссектрисы угла к оси резьбы.

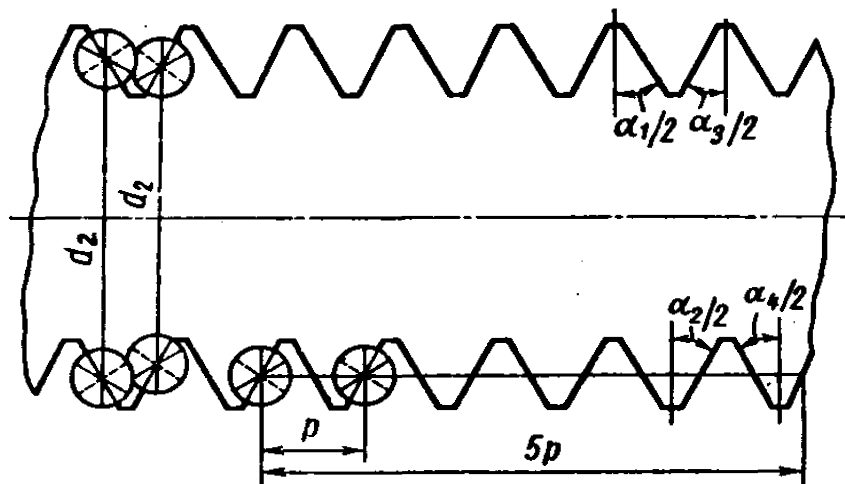


Рисунок 14.108 - Схема измерения среднего диаметра резьбы по двум сторонам профиля, угла профиля по его половинам и шага резьбы по его одной величине и нескольким виткам

Предварительно градусную шкалу устанавливают на 0° , 90° , 180° или 270° , чтобы одна из линий штриховой сетки была перпендикулярна оси резьбы, и одно из указанных значений принимают за начало первого отсчета. Затем линию штриховой сетки, перпендикулярную оси резьбы, совмещают поочередно в противоположных направлениях правой стороны профиля, произведя второй отсчет, и подсчитывают среднее значение по формуле (14.1)

$$\frac{d_{np}}{2} = \frac{\frac{d_3}{2} + \frac{d_4}{2}}{2}, \quad (14.1)$$

Аналогичные действия производят по левой стороне профиля по формуле (14.2)

$$\frac{d_{лев}}{2} = \frac{\frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2}}{2}, \quad (14.2)$$

Измерение шага резьбы производится продольным перемещением микровинта или с применением плоскопараллельных концевых мер, что исключает погрешность микровинта. При этом колонку наклоняют на угол подъема резьбы, совмещают с помощью микровинтов поперечного и продольного хода и вращения сетки окулярной головки штриховую линию сетки со стороной профиля и производят первый отсчет; затем перемещают стол в продольном направлении до совпадения этой штриховой линии с соответствующей стороной профиля через один или несколько шагов резьбы, производят второй отсчет и узнают разность отсчетов. Для более точных результатов рекомендуется измерение шага производить по правым и левым сторонам профиля на двух противоположных сторонах.

Среднее арифметическое из четырех полученных результатов измерений принимают за действительный размер шага на данном участке и вычисляют по формулам (14.3) и (14.4)

$$P_n = \frac{P_1 n + P_2 n + P_3 n + P_4 n}{4}, \quad (14.3)$$

$$P = \frac{P_n}{n}, \quad (14.4)$$

где n - число витков

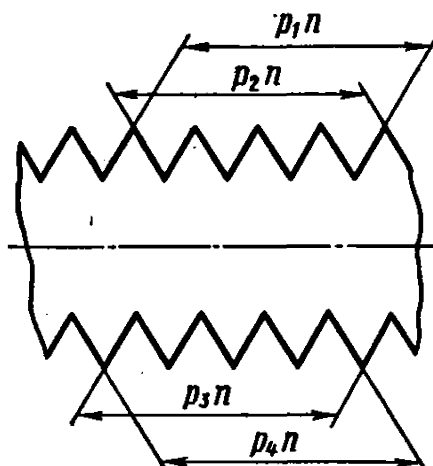


Рисунок 14.109 - Измерение шага резьбы по правым и левым сторонам профиля на его противоположных сторонах

Установка плоских изделий

При установке плоских изделий непосредственно на предметном столе необходимо, чтобы базовая поверхность изделия была параллельна продольному перемещению стола. Проверка этого осуществляется

перемещением стола с изделием при наблюдении в окуляр за тем, что наведенная на базовую поверхность штриховая линия сетки не сходит с нее во время перемещения.

Закрепляемое на микроскопе изделие надо тщательно проверить на надежность его установки, так как при падении могут быть повреждены стекло стола и оптика.

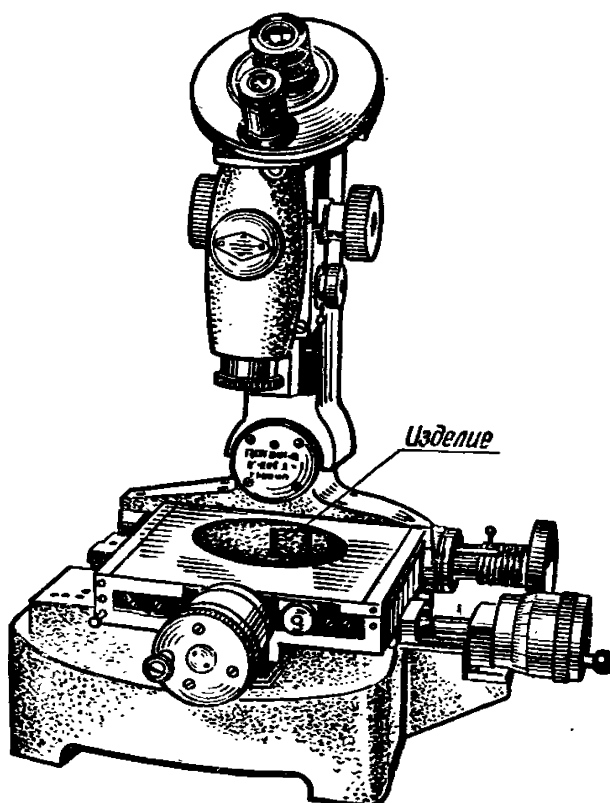
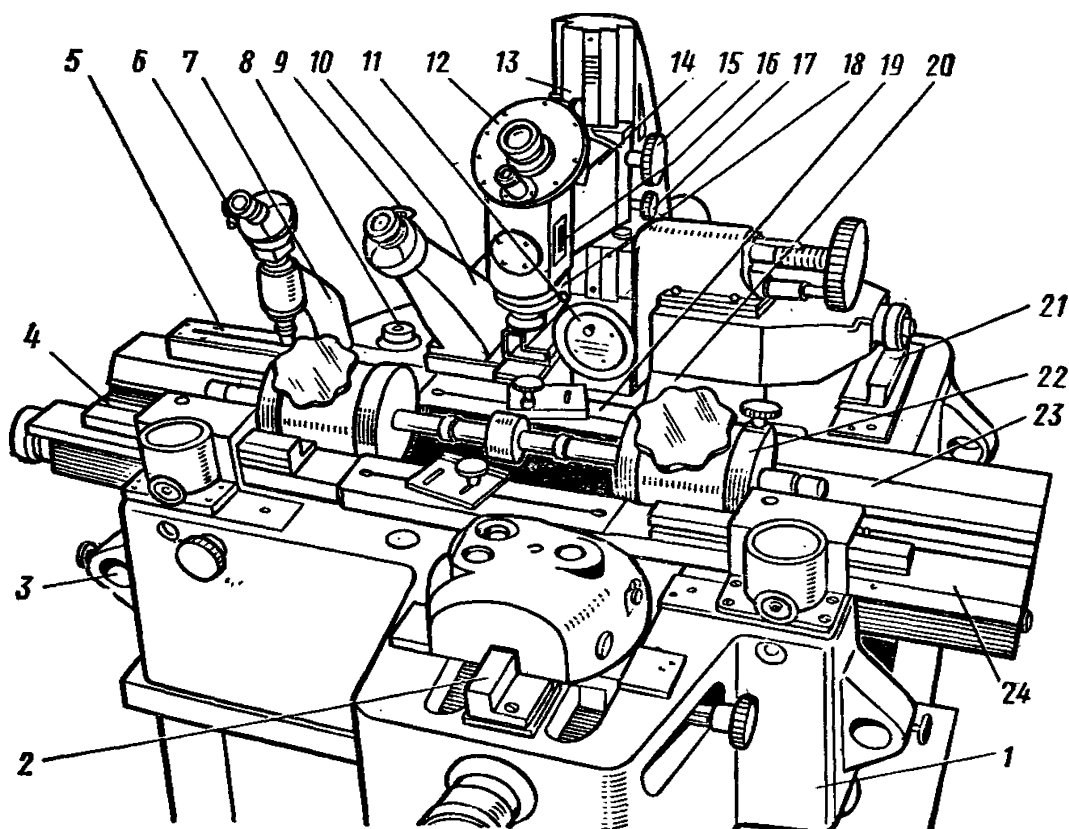


Рисунок 14.110 - Установка плоских изделий на предметном столике

Универсальный измерительный микроскоп УИМ

Универсальный измерительный микроскоп предназначен для измерения длин, углов и профилей изделий. Методы измерений — проекционный и осевого сечения.



1 — основание. 2, 4, 21, 24 — направляющие, 3 — проушины. 5 — шкала продольного хода, 6, 9 — маховичок отсчетного микроскопа, 7 — отсчетный микроскоп продольного хода, 8 — уровень. 10 — отсчетный микроскоп поперечного хода. 11 — регулировочное кольцо диаметра отверстия диафрагмы осветительного устройства, 12 — штриховая окулярная головка. 13 — колонка. 14 — кронштейн. 15 — кремальера, 16 — главный микроскоп. 17 — тормозной винт, 18 — кольцо точной установки по высоте главного микроскопа. 19 — опорная плоскость, 20 — поперечная каретка, 22 — центровая бабка. 23 — направляющее ложе.

Рисунок 14.111 - Микроскоп УИМ

Пределы измерения длин:

в продольном направлении	200 мм
в поперечном	100 мм
Цена наименьшего деления отсчетного микроскопа	
со спиральным кониусом	0,001 мм
Предел измерения углов	360°

Цена наименьшего деления штриховой окулярной головки 1'

Увеличение главного микроскопа	10 ^x —50 ^x
Поле зрения главного микроскопа	4,2—21 мм
Увеличение отсчетного микроскопа	62 ^x
Увеличение угломерного микроскопа	45 ^x
Поворот колонки	±2°30'

Чтение показаний

Для отсчета перемещения служат стеклянные миллиметровые шкалы продольного и поперечного хода и отсчетные микроскопы со спиральными нониусами. Целые и десятые доли миллиметра определяются оцифрованным миллиметровым штрихом в зоне шкалы десятых долей миллиметра, установленном посередине двойного штриха спирали. Сотые и тысячные доли миллиметра определяются отсчетным индексом по круговой шкале.

Пример

Миллиметровый штрих 46 находится в зоне шкалы десятых долей миллиметра между цифрами 3 и 4. Отсчетный индекс находится в зоне круговой шкалы возле цифры 62.

Отсчет 46,362 мм.

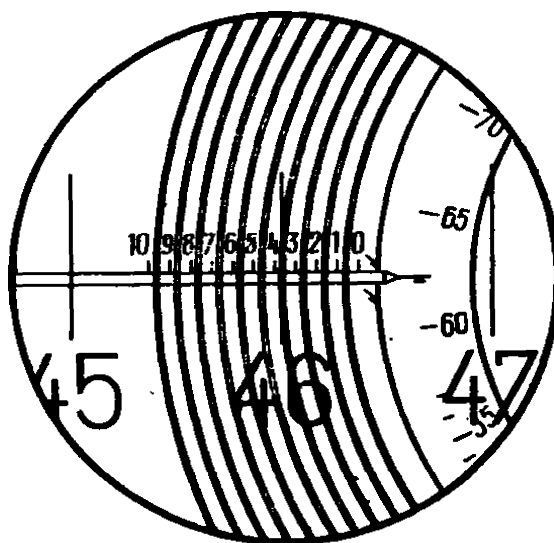


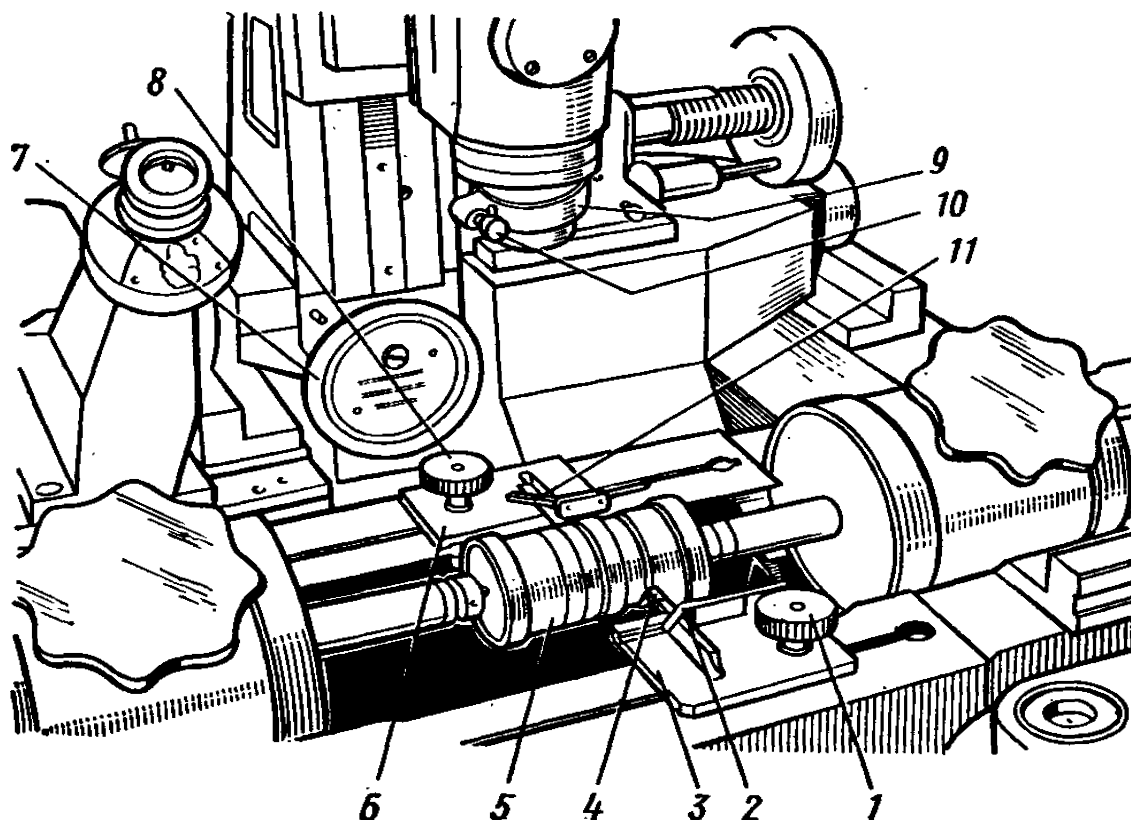
Рисунок 14.112-Чтение показаний

Проекционный метод

Проекционный (теневой) метод измерения на универсальном микроскопе применяют аналогично измерениям на инструментальных микроскопах, но с большей точностью установки изделия и отсчета результатов измерения.

Метод осевого сечения

Методом осевого сечения пользуются при помощи ножей. Ножи определяют собой плоскость измерения (для тел вращения эта плоскость будет осевым сечением). Помимо тел вращения методом осевого сечения можно также измерять плоские детали. Перед установкой ножей на конец оправы объектива надо надеть насадку, закрепить ее винтом, полностью открыть диафрагму и установить измеряемое изделие. В процессе измерения в поперечном направлении перемещают микроскоп, а в продольном—стол с изделием. Грубое перемещение микроскопа и стола производится от руки, точнее — с помощью соответствующих микровинтов.



1, 8 - винт, 2, 11 - ножедержатель, 3, 6 - опорная площадка,
4 - измерительный нож, 5 - калибр, 7 - регулировочное кольцо открытия
диафрагмы, 9 - насадка, 10 - винт

Рисунок 14.113 - Метод осевого сечения

Установка ножей

На наименьшем расстоянии к изделию надо установить опорные площадки и закрепить их винтами. После этого помещают измерительный нож под ножедержатель, отжимают ножедержатель и, придерживая его в отжатом состоянии, передвигают нож (другой рукой), отпускают ножедержатель, закрепляя нож в положении, когда между ним и изделием отсутствует зазор при малом измерительном усилии.

Установку ножей надо производить осторожно, так как малейшая зазубрина на них вызовет неплотное прилегание к изделию, что отразится на результате измерения. Нельзя перемещать придвинутый к изделию нож, а также поворачивать или перемещать изделие при придвинутых ножах.

Измерение методом осевого сечения

При этом методе наводка пунктирных линий штриховой сетки производится не по теневому контуру изделия, а по риску и лезвию ножа. При

измерении длин, после того как ножи придвинуты к измеряемому изделию, одну из пунктирных линий с соответствующей ценой деления совмещают с риской ножа, тогда средняя пунктирная линия совмещается с линией касания ножа и контура изделия и производят отсчет по шкале поперечного хода. Затем перемещают поперечную каретку, производят такую же наводку на противоположной стороне изделия, используя уже вторую, на столько же удаленную от середины пунктирную линию и производят второй отсчет. При таком методе измерения величина перемещения каретки равна размеру изделия, так как a — расстояние от лезвия ножа к риску ножа равно расстоянию на сетке между соответствующими штрихами, следовательно $d=l$.

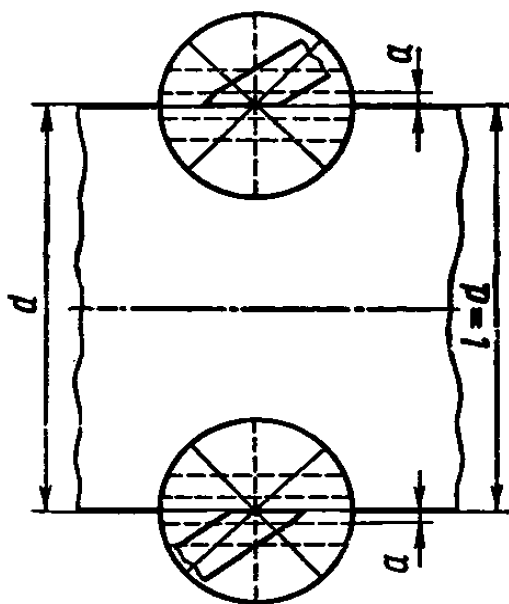


Рисунок 14.114 - Схема измерения длины методом осевого сечения

Выбор средств измерений

Действительным размером называется размер, полученный измерением с допустимой погрешностью. Выбираемые методы и средства измерений должны обеспечивать получение действительных размеров при наименьшей затрате средств и времени на измерение.

Пределы допускаемых погрешностей измерений подбираются в зависимости от допусков на изготовление изделия при измерении линейных размеров от 1 до 500 мм определяются по ГОСТ 8.051—81, а затем выбор средств измерений производится по общемашиностроительным типовым руководящим материалам ОМТРМ-0466-001-66.

Средства измерений указываются в технологической документации, которой пользуются рабочие. Правильный выбор калибров и другого жесткого СИ –(мерителя) обеспечивается его маркировкой.

При отсутствии указания о выборе средства измерения, для самостоятельного решения этого вопроса можно ориентироваться примерно на отношение 1:4, 1:5, в крайнем случае – 1:3 - величины отсчета или цены деления средства измерения к допуску измеряемого размера изделия.

При получении средства измерения обязательно надо убедиться (по парафинированию, отметке в аттестате и т. п.) не просрочена ли его поверка.

14.2 Средства измерения давления. Общие сведения

Давлением называют отношение силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности. Давление - одна из основных величин, определяющих термодинамическое состояние веществ. Давлением во многом определяется ход технологического процесса, состояние технологических аппаратов и режимы их функционирования. С задачей измерения давления приходится сталкиваться при измерениях некоторых технологических параметров, например расхода газа или пара, при изменяющихся термодинамических параметрах, уровня жидкости, и др.

Различают следующие виды давления: атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуум (разрежение).

Атмосферное (барометрическое) давление - давление, создаваемое массой воздушного столба земной атмосферы.

Абсолютное давление - давление, отсчитанное от абсолютного нуля. За начало отсчета абсолютного давления принимают давление внутри сосуда, из которого полностью откачан воздух.

Избыточное давление - разность между абсолютным и барометрическим давлениями.

Вакуум (разрежение) - разность между барометрическим и абсолютным давлениями.

В Международной системе единиц (СИ) за единицу давления принят паскаль (Па) - давление, создаваемое силой в 1 ньютон (Н), равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м² и направленной нормально к ней.

Разнообразие видов измеряемых давлений, а также областей их применения в технологии и научных исследованиях обусловило использование наряду с системной единицей давления и внесистемных единиц. К их числу относятся бар, миллиметр ртутного столба, килограмм-сила на квадратный сантиметр, килограмм-сила на квадратный метр, миллиметр водного столба. Соотношения единиц давления, допущенных к применению, приведены в приложении Б.

Средства измерений давления классифицируют по виду измеряемого давления и принципу действия.

$$P_{\text{абс.}} = P_{\text{атм.}} + P_{\text{изб.}}; \quad P_{\text{раз.}} = P_{\text{абс.}} - P_{\text{атм.}}; \quad P_{\text{изб.}} = P_{\text{абс.}} - P_{\text{атм.}};$$

По виду измеряемого давления средства измерений подразделяют на:

манометры избыточного давления — для измерения избыточного давления;

манометры абсолютного давления — для измерения давления, отсчитанного от абсолютного нуля;

барометры — для измерения атмосферного давления;

вакуумметры — для измерения вакуума (разрежения);

мановакуумметры — для измерения избыточного давления и вакуума (разрежения).

Кроме перечисленных средств измерений в практике измерений получили распространение:

напоромеры — манометры малых избыточных давлений (до 40 кПа);

тягомеры — вакуумметры с верхним пределом измерения не более - 40 кПа;

тягонапоромеры — мановакуумметры с диапазоном измерений +20÷-20 кПа;

вакуумметры остаточного давления — вакуумметры, предназначенные для измерения глубокого вакуума или остаточного давления, т. е. абсолютных давлений менее 200 Па;

дифференциальные манометры — средства измерений разности давлений.

По принципу действия средства измерений давления подразделяют на: жидкостные, поршневые, деформационные (пружинные), ионизационные, тепловые, электрические. Такое подразделение не является исчерпывающим и может быть дополнено средствами измерений, основанными на иных физических явлениях.

В настоящее время существует большой парк средств измерений давления, позволяющий осуществить измерение давления в диапазоне 10^{-12} - 10^{11} Па (рисунок 14.115) /8/.

Далее рассмотрены средства измерений давления, широко применяемые в качестве рабочих при технологических измерениях. Средства измерений, применяемые в качестве образцовых, в настоящее время их называют как рабочие эталоны, рассматривать которые нужно в отдельных источниках литературы.

14.2.1 Жидкостные средства измерений давления с гидростатическим уравниванием

В жидкостных приборах с гидростатическим уравниванием мерой измеряемого давления является высота столба рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости, называемой затворной или манометрической, применяются дистиллированная вода, ртуть, этиловый спирт, трансформаторное масло.

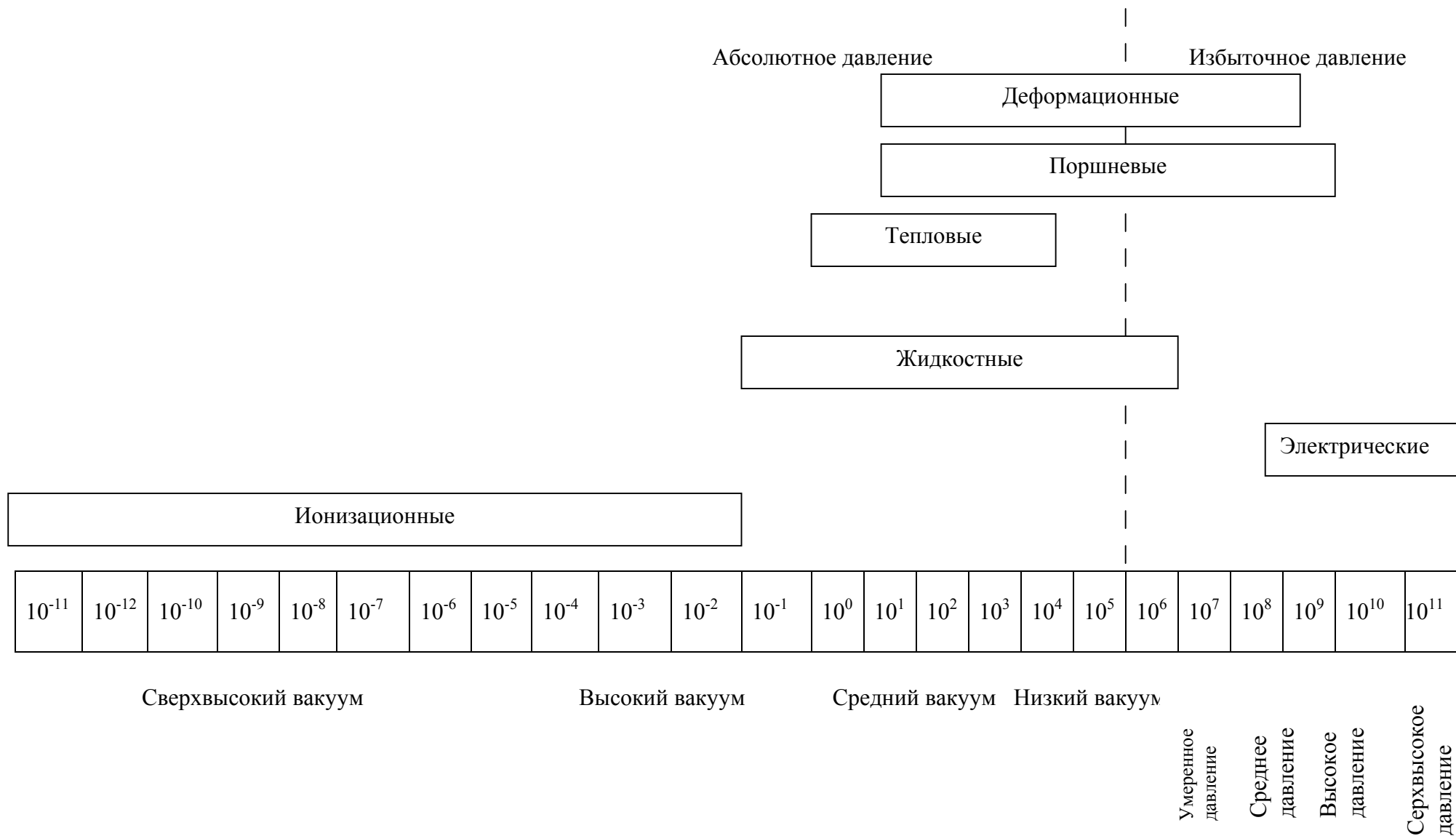


Рисунок 14.115-Диапазон давлений (в Па), охватываемый существующими средствами измерений давления

Выбор рода рабочей жидкости определяется диапазоном измеряемого давления, условиями эксплуатации и требуемой точностью измерений.

В настоящее время номенклатура жидкостных средств измерений давления с гидростатическим уравниванием существенно ограничена. В большинстве случаев они заменены более совершенными деформационными средствами измерений. К числу жидкостных средств измерений давления (разности давлений и разрежения) с гидростатическим уравниванием, которые еще применяются на технологических потоках, относятся поплавковые и колокольные дифманометры. Поплавковые дифманометры. Принцип действия поплавковых дифманометров основан на уравнивании измеряемого перепада давления гидростатическим давлением, создаваемым столбом рабочей жидкости, заполняющей дифманометр. Поплавковый дифманометр (рисунок 14.116а) представляет собой два сообщающихся сосуда.

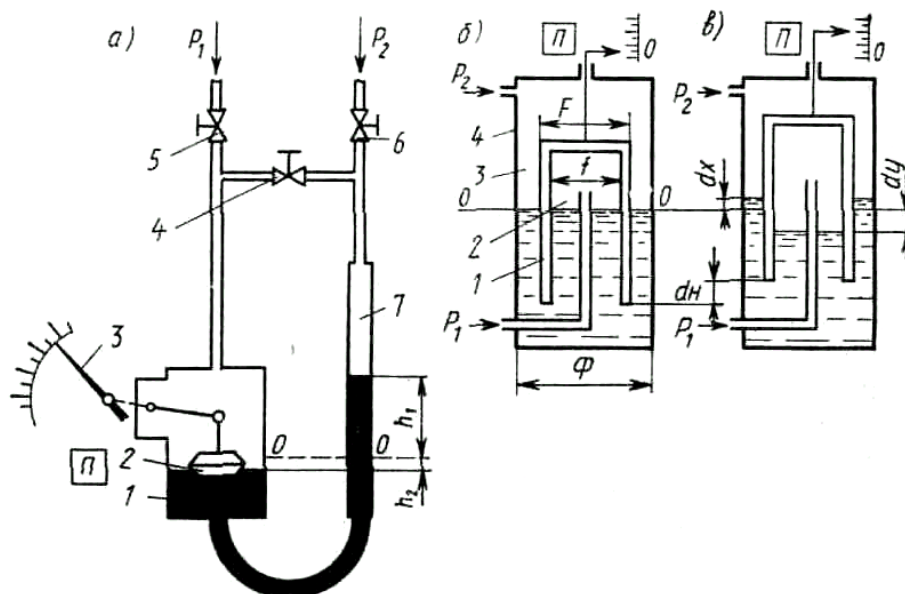


Рисунок 14.116 - Схемы жидкостных приборов для измерения давления

Площадь сечения F широкого сосуда 1 значительно больше площади сечения f узкого сосуда 7. Внутренняя полость сообщающихся сосудов заполняется рабочей жидкостью (ртутью или трансформаторным маслом) до нулевой отметки. О значении измеряемой разности давлений в этих приборах судят по отсчетному устройству, указатель 3 которого связан с поплавком 2, расположенным во внутренней полости широкого сосуда. При подключении прибора к объекту измерения большее давление подается в сосуд 1, а меньшее в сосуд 7. Подача давления осуществляется через вентили 5 и 6. Вентиль 4 служит для того, чтобы исключить возможность выброса рабочей жидкости при односторонней подаче давления. С этой целью перед подключением прибора к объекту вентиль 4 открывают, а после стабилизации давления в

обоих сосудах закрывают. При отключении прибора от объекта необходимо предварительно открыть вентиль 4, а затем закрыть вентили 5 и 6.

В процессе измерения, жидкость в широком сосуде перемещается вниз, а вместе с ним перемещается поплавков 2, который через механическую передачу перемещает указатель 3 отсчетного устройства. Перемещение поплавка будет происходить до тех пор, пока измеряемая разность давлений $P_1 - P_2$ не уравнивается давлением столба жидкости высотой $h_1 + h_2$. Перемещение поплавка можно рассчитать по формуле (14.5) /8/

$$P_1 - P_2 = g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{с}}) (h_1 + h_2), \quad (14.5)$$

где g - местное ускорение свободного падения;

h_1 и h_2 - перемещение уровня жидкости в правом и левом коленах;

$\rho_{\text{ж}}$ - плотность рабочей жидкости;

$\rho_{\text{с}}$ — плотность измеряемой среды.

Принимая во внимание равенство объема жидкости, вытесненного из широкого сосуда, объему жидкости, поступившему в узкий сосуд получаем формулу (14.6) /8/

$$F h_2 = f h_1, \quad (14.6)$$

преобразуем уравнение (14.6) в (14.7) /8/

$$h_2 = \frac{1}{(1 + F/f)(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{с}})g} (P_1 - P_2), \quad (14.7)$$

Уравнение (14.7) представляет собой статическую характеристику поплавкового дифманометра, из которой следует: чтобы получать одинаковое перемещение h_2 поплавка при измерении разности давлений в различных диапазонах, необходимо изменять отношение F/f . Практически это достигается заменой узкого сосуда одного диаметра на сосуд другого диаметра. Поплавковые дифманометры имеют несколько сменных сосудов (стаканов), замена которых позволяет изменять предельные номинальные перепады давления. Для поплавковых дифманометров предельный номинальный перепад $\Delta P_{\text{ном}}$ связан с максимальным измеряемым перепадом $\Delta P = P_1 - P_2$ соотношением (14.8) /8/

$$\Delta P_{\text{ном}} = \Delta P (1 - \rho_{\text{с}}/\rho_{\text{ж}}), \quad (14.8)$$

где $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{с}}$ — плотности рабочей жидкости и среды при температуре 20°C и атмосферном давлении.

Поплавковые дифманометры рассчитаны на номинальные перепады давления, верхние пределы которых ограничены значениями от 6,3 кПа до 0,10

МПа. Поплавковые дифманометры используются при статических давлениях измеряемой среды не более 25 МПа. Класс точности поплавокковых дифманометров 1,0 и 1,5. Для передачи на расстояние информации о значении измеряемого перепада давления, рассматриваемые дифманометры оснащаются преобразователями Π перемещения указателя 3 в унифицированный сигнал измерительной информации. Принцип действия и устройство преобразователей перемещения рассмотрен широко в технической литературе.

Передаточные механизмы поплавокковых дифманометров, применяемых для измерения расхода веществ, оснащаются лекалами, профиль которых рассчитывают по квадратичной корневой зависимости. Показания этих поплавокковых дифманометров пропорциональны измеряемому расходу.

Высокая точность измерений и возможность регистрации показаний без применения специальных источников энергии являются преимуществами дифманометров данного типа. Основным их недостатком является наличие токсичной жидкости — ртути, которая при резких изменениях давления может загрязнять объект измерения или окружающую среду.

Колокольные дифманометры. Дифманометры этого типа представляют собой колокол, погруженный в рабочую жидкость и перемещающийся под влиянием разности давлений. Противодействующая сила создается за счет утяжеления колокола при его подъеме и уменьшении тяжести колокола при его погружении. Достигается это за счет изменения гидростатической подъемной силы, действующей на колокол согласно закону Архимеда.

Принцип действия колокольного дифманометра поясняет рисунок 14.116 б, в. Если давления в измерительных камерах 2 и 3 равны между собой, то колокол 1 находится в положении, показанном на рисунке 14.116 б.

Если перепад давлений на колоколе получает некоторое приращение $d(P_1 - P_2)$, то колокол всплывает. Всплытие происходит до тех пор, пока изменение подъемной силы от перепада давления на колокол и изменение гидростатической подъемной силы не уравновесятся.

Для состояния равновесия, иллюстрируемого рисунком 14.116 в, справедливы равенства (14.9), (14.10), (14.11), (14.12) /8/

$$d(P_1 - P_2)F = (dH + dy)\Delta f g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{с}}), \quad (14.9)$$

$$dh = dy + dx, \quad (14.10)$$

$$d(P_1 - P_2) = dh(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{с}})g, \quad (14.11)$$

$$f dy = \Delta f dH + (\Phi - F)dx, \quad (14.12)$$

где F - площадь внешнего поперечного сечения колокола;

dH - перемещение колокола;

dy - перемещение жидкости под колоколом;

Δf - площадь поперечного сечения стенок колокола;

$\rho_{ж}, \rho_c$ - плотность рабочей жидкости и измеряемой среды;
 dh - разность уровней жидкости снаружи и внутри колокола;
 dx - перемещение жидкости в широком сосуде;
 P - площадь поперечного сечения широкого сосуда;
 f - внутренняя площадь поперечного сечения колокола.

Решая совместно уравнения (14.9)—(14.12), получим зависимость (14.13) /8/, которая после интегрирования в пределах от нуля до $P_1—P_2$ преобразуется к виду (14.14)

$$dH = \frac{f}{\Delta f g (c_{ж} - c_c)} d(P_1 - P_2), \quad (14.13)$$

$$H = \frac{f}{\Delta f g (c_{ж} - c_c)} (P_1 - P_2), \quad (14.14)$$

Уравнение (14.14) представляет собой статическую характеристику колокольного дифманометра с гидростатическим уравниванием. Для обеспечения измерения перепада давления в широком диапазоне значение отношения $f/\Delta f$ должно быть по возможности уменьшено.

Колокольные дифманометры с гидростатическим уравниванием обладают высокой чувствительностью и могут быть использованы для измерения малых давлений, перепадов давлений и разрежений.

Некоторые модификации колокольных дифманометров с гидростатическим уравниванием оснащаются преобразователями П, посредством которых перемещение поплавка преобразуется в унифицированный сигнал измерительной информации, передаваемый по каналу связи.

14.2.2 Чувствительные элементы деформационных средств измерений давления

Принцип действия деформационных средств измерений давления основан на использовании упругой деформации чувствительного элемента (ЧЭ) или развиваемой им силы. Мерой измеряемого давления в средствах измерений данного вида является деформация упругого ЧЭ или развиваемая им сила. Различают три основные формы ЧЭ, получивших распространение в практике измерения: трубчатые пружины, сильфоны и мембраны.

Трубчатые пружины. Трубчатая пружина (манометрическая трубка, пружина Бурдона) - упругая криволинейная металлическая полая трубка, один из концов которой имеет возможность перемещаться, а другой - жестко закреплен. Трубчатые пружины используются в основном для преобразования измеряемого давления, поданного во внутреннее пространство пружины, в

пропорциональное перемещение ее свободного конца. Наиболее распространена одновитковая трубчатая пружина, представляющая собой изогнутую по дуге окружности трубку с обычно овальным поперечным сечением (рисунок 14.117 а).

Под влиянием поданного избыточного давления трубка раскручивается, а под действием разрежения скручивается. Такое направление перемещения трубки объясняется тем, что под влиянием внутреннего, избыточного давления малая ось трубки (ось b) увеличивается, в то время как длина трубки остается постоянной. Длина трубки также изменяется, но эти изменения столь малы по сравнению с длиной, что на общее перемещение трубки оно не оказывает существенного влияния.

Для тонкостенных трубок изменение центрального угла трубки под действием внутреннего, избыточного давления P описывается выражением (14.15) /8/

$$\Delta\gamma = P\gamma \frac{1-\mu^2}{E} \frac{R^2}{bh} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{\alpha}{\beta + \aleph^2}, \quad (14.15)$$

где γ - центральный угол трубки;

μ - коэффициент Пуассона;

E - модуль упругости материала трубки;

R - радиус кривизны центральной оси трубки (центральная ось — геометрическое место центров тяжести поперечных сечений);

H - толщина стенки;

a и b - большая и малая полуоси овального сечения, измеренные по среднему контуру;

α и β - эмпирические коэффициенты, зависящие от формы поперечного сечения трубки;

$\aleph = R h / a^2$ - главный параметр трубки.

Составляющая сила в направлении касательной к оси на свободном конце тонкостенной трубки (у тонкостенных трубок отношение $h/b = 0,6 \div 0,7$) может быть найдена из выражения (14.16) /8/

$$N_t = Pab \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{48S}{\varepsilon + \aleph^2} \frac{\gamma - \sin \gamma}{3\gamma - 4\sin \gamma + \sin \gamma \cos \gamma} \quad (14.16)$$

Сила в радиальном направлении вычисляется по формуле (14.17) /8/

$$N_r = Pab \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{48S}{\varepsilon + \aleph^2} \frac{1 - \cos \gamma}{\gamma - \sin \gamma \cos \gamma} \quad (14.17)$$

где S и ε — коэффициенты, зависящие от отношения b/a .

В уравнениях (14.16) и (14.17) все величины, за исключением P , постоянные. Поэтому для трубчатой пружины справедливо равенство (14.18) /8/

$$N=kP, \quad (14.18)$$

где $k=f(a;b;h;R;\gamma)$

Как следует из приведенных зависимостей, путем изменения a/b , R , H и γ можно изменять величины $\Delta\gamma$ и N , а следовательно, и чувствительность измерения. Практически увеличение γ достигается путем увеличения числа витков трубчатой пружины. На рисунке 14.117 б показана винтовая n -витковая трубчатая пружина. Величина γ в чувствительных элементах этой формы равна $360^\circ n$. Для измерения высоких давлений до 1000 МПа используют криволинейные и прямолинейные трубчатые пружины. Форма сечения прямолинейной трубчатой пружины показана на рисунке 14.117 в. Перемещение свободного конца пружины происходит не из-за изменения поперечного сечения, а благодаря изгибающему моменту, который можно вычислить по формуле (14.19) /8/

$$M=\pi r^2 l P, \quad (14.19)$$

где πr^2 - площадь канала;

l - расстояние от центра канала до центра тяжести;

P - измеряемое избыточное давление, направленное в сторону более толстой стенки.

Основной недостаток рассмотренных пружин — малый угол поворота, что требует применения передаточных механизмов. Этот недостаток устранен в чувствительных элементах типа витой трубчатой пружины овального или звездчатого сечения (рисунок 14.117 г). Угол поворота такой витой пружины составляет $40\text{—}60^\circ$. Это позволяет отказаться от применения передаточного механизма, так как стрелка может быть укреплена непосредственно на свободном конце пружины. Трубчатые пружины для давлений до 5 МПа изготавливают из латуни, томпака, бронзы; для изготовления пружин, рассчитанных на давления свыше 5 МПа, применяют легированные сплавы, стали различных составов. Для давлений 1000 МПа и более применяют легированную сталь типа 50 ХФА.

Сильфоны. Сильфон — тонкостенная цилиндрическая оболочка с поперечными гофрами (рисунок 14.117 д), способная получать значительные перемещения под действием давления или силы. В пределах линейности статической характеристики сильфона отношение действующей на него силы к вызванной ею деформации остается постоянным и называется *жесткостью* сильфона.

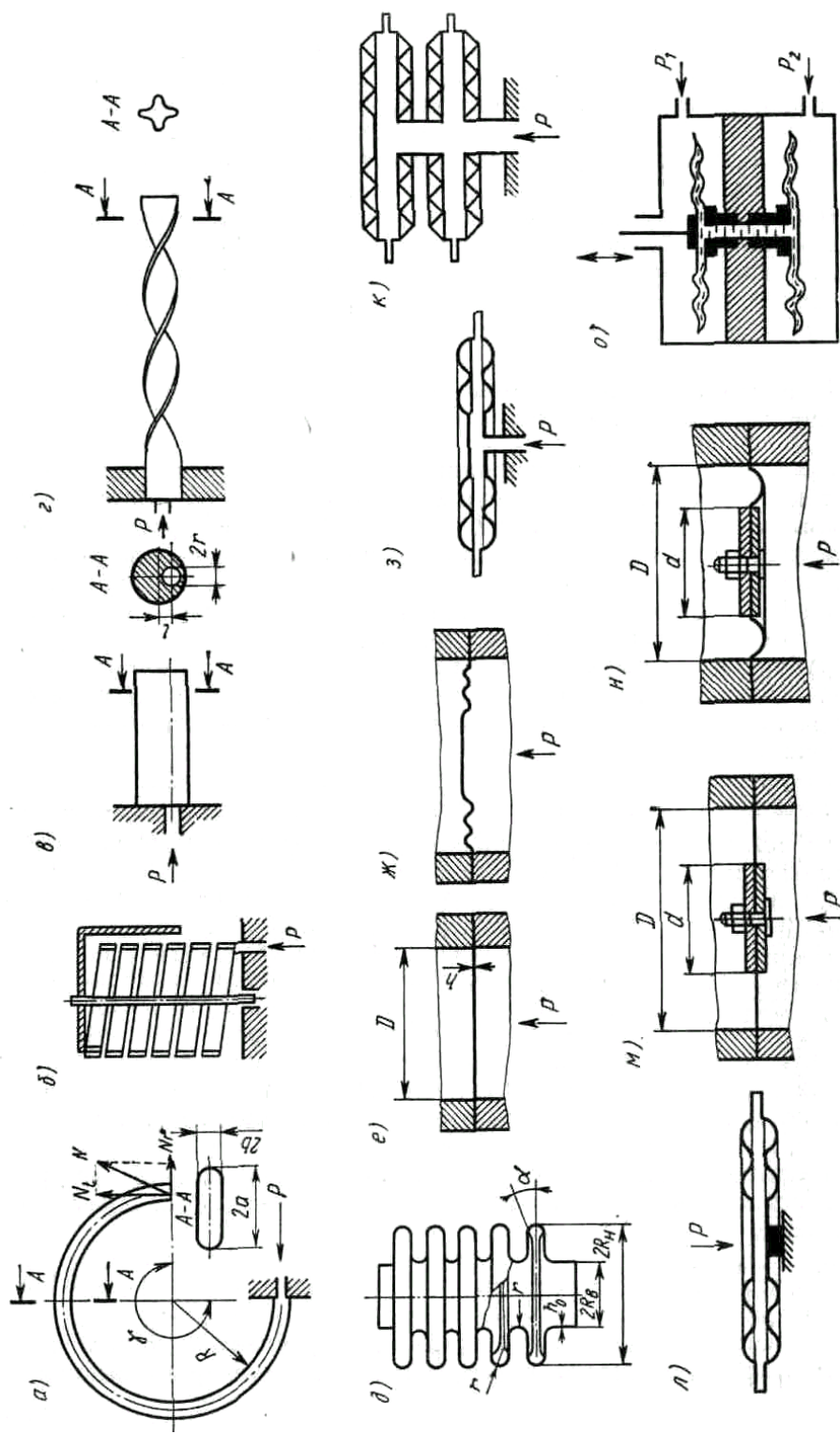


Рисунок 14.117 – Конструкции чувствительных элементов деформационных средств измерения давления

Для увеличения жесткости внутри сиффона часто помещают пружину. Сиффоны изготавливают из бронзы различных марок, полутомпака, углеродистой стали, нержавеющей стали, алюминиевых сплавов и др. Серийно производят бесшовные и сварные сиффоны диаметром от 8—10 до 80—100 мм и толщиной стенки 0,1—0,3 мм. Осевое перемещение δ дна сиффона под действием осевой силы N определяют по формуле (14.20) /8/

$$\delta = N \frac{1 - \mu^2}{E h_0} \frac{n}{A_0 - \alpha A_1 + \alpha A_2 + B_0 h / R_b^2}, \quad (14.20)$$

где h_0 — толщина стенки на внутреннем диаметре (принимают равной толщине трубки, из которой изготавливают сиффон);

n — число рабочих гофров;

α — угол уплотнения;

A_0, A_1, A_2, B_0 — коэффициенты, зависящие от отношений

R_H/R_B и r/R_B (R_H и R_B — наружный и внутренний радиусы сиффона;

r — радиус закругления гофров по средней линии контура).

Осевую силу можно определить, зная разность давлений ΔP , действующую на сиффон, т. е. $N = \Delta P F_{эф}$, где $F_{эф} = \pi(R_H + R_B)^2/4$ — эффективная площадь сиффона, которая при значительных перемещениях дна сиффона остается практически постоянной.

Мембраны. Различают упругие и эластичные (вялые) мембраны. *Упругая мембрана* — гибкая круглая плоская (плоская мембрана) или гофрированная (гофрированная мембрана) пластина, способная получить прогиб под действием давления (рисунок 14.117 е, ж). Статическая характеристика плоских мембран изменяется нелинейно с увеличением давления, поэтому здесь в качестве рабочего участка используют небольшую часть возможного хода. Гофрированные мембраны могут применяться при больших прогибах, чем плоские, так как имеют значительно меньшую нелинейность характеристики. Мембраны изготавливают из различных марок стали, бронзы, томпака, латуни и т. д. Величина прогиба δ центра плоской мембраны, закрепленной по контуру, при малых перемещениях под действием давления P вычисляется по формуле (14.21) и равна /8/

$$\delta = \frac{3(1 - \mu^2)}{16} \frac{P R^4}{E h^3}, \quad (14.21)$$

где R — рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления);

h — толщина мембраны.

Величину прогиба δ гофрированных мембран определяют из выражения (14.22) /8/

$$a = \delta/h + b\delta^3/h^3 = PR^4/(Eh^4), \quad (14.22)$$

где a и b —коэффициенты, зависящие от формы профиля мембраны и ее толщины.

Гофры применяются треугольной, трапецевидной, синусоидальной и круговой форм. При необходимости получения большего прогиба используют соединение мембран в виде *мембранных коробок* (рисунок 14.117 з), а также блоки, собранные из нескольких мембранных коробок (рисунок 14.117 к).

Глубина гофр оказывает существенное влияние на линейность статической характеристики. Чем больше глубина гофр, тем линейность статической характеристики выше.

При измерении атмосферного (барометрического) давления получили распространение гофрированные мембранные коробки, из внутренней полости которой воздух удален (рисунок 14.117 л). *Эластичная мембрана*, предназначенная для измерения малых давлений и разности давлений, представляет собой зажатые между фланцами плоские или гофрированные диски, выполненные из прорезиненной ткани, тефлона и др. Плоские и гофрированные эластичные мембраны предназначены в основном для создания достаточных перестановочных усилий при сравнительно небольших перемещениях. Перестановочное усилие эластичной мембраны зависит от ее эффективной площади, которая при умножении на перепад давления создает усилие, приложенное к геометрическому центру мембраны. Эффективная площадь плоской эластичной мембраны, зажатой между фланцами, при малом прогибе мембраны приближенно равна 1/3 ее полной геометрической площади (остальные 2/3 площади передают усилие к опоре), т. е. $F_{эф} = \pi D^2/12$, где D —диаметр опоры мембраны. Перестановочное усилие, создаваемое такой мембраной будем вычислять по формуле (14.23) /8/

$$N = PF_{эф} = P \frac{\pi D^2}{12}, \quad (14.23)$$

В большинстве случаев используют лишь часть максимально возможного хода мембраны (до 10 %). При большом ходе мембраны связь между усилием N и ходом центра мембраны нелинейна. Для уменьшения нелинейности и увеличения перестановочного усилия применяют эластичные мембраны с жестким центром, представляющим собой два металлических диска, закрепленных с двух сторон на мембране; оставшаяся свободная часть мембраны между дисками жесткого центра и заделкой по периферии образует эластичное мембранное кольцо. Усилие, создаваемое мембраной с жестким центром под действием давления P , вычисляется по формуле (14.24) /8/

$$N = \frac{\pi(D^2 + Dd + d^2)}{12} P, \quad (14.24)$$

где D — диаметр мембраны;
 d — диаметр жесткого центра.

На рисунке 14.117 м, н показаны типы эластичных мембран. При измерении перепада давления необходимо, чтобы при воздействии односторонних перегрузок на чувствительный элемент не происходило его повреждения.

Применение *мембранных блоков с жидкостным заполнением* (рисунок 14. 117 о) позволяет решить эту задачу. При односторонней перегрузке, когда разность давлений $P_1 — P_2$ больше верхнего предела измерений, на который рассчитан чувствительный элемент повреждение коробки не происходит, так как мембраны складываются по профилю, а жидкость перетекает во вторую коробку. Одной из основных характеристик деформационного, чувствительного элемента является зависимость перемещения δ рабочей точки от действующего давления P или разности давлений. Эта характеристика $\delta = f(P)$, называемая статической, может быть линейной или нелинейной. Ход статической характеристики в пределах упругой деформации неоднозначен и образует петлю гистерезиса. Значение гистерезиса определяет систематическую погрешность деформационных средств измерений.

Кроме отмеченного недостатка чувствительным элементам присуще свойство *упругого последействия*, суть которого состоит в том, что после прекращения изменения давления деформация продолжает уменьшаться, асимптотически приближаясь к предельному значению. Наряду с упругим последействием при эксплуатации чувствительных элементов имеет место *остаточная деформация*, заключающаяся в том, что после снятия давления чувствительный элемент не возвращается в исходное положение. При многократных измерениях остаточная деформация накапливается, что приводит к значительным погрешностям. Изложенные особенности деформационных, чувствительных элементов объясняют тот факт, что для технических манометров верхний предел измерений ограничивается половиной давления, соответствующего пределу пропорциональности статической характеристики, в то время как для образцовых приборов предел измерений ограничивается четвертой частью давления, соответствующего пределу пропорциональности.

14.2.3 Деформационные приборы для измерения давления

Высокая точность, простота конструкции, надежность и низкая стоимость являются основными факторами, обуславливающими широкое распространение деформационных приборов для измерения давления в промышленности и научных исследованиях.

14.2.3.1 Измерительные приборы с одновитковой трубчатой пружиной

Эти приборы предназначены для измерения избыточного давления и разрежения неагрессивных жидких и газообразных сред. Приборы этого типа выпускаются только показывающие в обыкновенном, виброустойчивом, антикоррозионном, пыле-, брызго- и взрывозащищенном исполнениях. Для передачи перемещения свободного конца деформационного ЧЭ к указателю манометра используют секторные и рычажные передаточные механизмы. С помощью передаточного механизма перемещение свободного конца трубчатой пружины в несколько градусов или миллиметров преобразуется в угловое перемещение стрелки на $270\text{—}300^\circ$. Рычажный передаточный механизм применяется в тех случаях, когда от манометра не требуется высокая точность измерения и он подвергается вибрации. Секторный передаточный механизм применяется в образцовых приборах и в приборах, где по условиям эксплуатации исключена вибрация.

На рисунке 14.118 показана конструкция манометра с секторным передаточным механизмом. Прибор состоит из трубчатой пружины 5, один конец которой впаян в отверстие держателя 1, а другой (подвижный) конец наглухо запаян и несет на себе наконечник 10. Полость пружины связана с измеряемой средой через канал в держателе 7, снабженном радиальным штуцером 14. Держатель прибора оснащен платой 2, на которой монтируется трибно-секторный механизм. Последний включает зубчатое колесо (трибку) 8 и зубчатый сектор 9. Для исключения люфта в передаточном механизме используется спиральная пружина 7, один конец которой с помощью штифта крепится на оси трибки, а другой—к колонке 6, укрепленной на плате 2. К хвостовику сектора 9 с помощью винта 12 крепится тяга 11. Посредством тяги перемещение свободного конца пружины передается зубчатому сектору, который имеет ось вращения 13. Вращение зубчатого сектора передается трибке, на оси которой насажена стрелка 4 для отсчета показаний на шкале 8. Шкала манометра равномерная, так как перемещение свободного конца пружины пропорционально измеряемому давлению. Регулировка хода стрелки производится винтом 12. Вакуумметр с одновитковой трубчатой пружиной конструктивно идентичен рассмотренному манометру. Отличие состоит только в шкале и направлении перемещения стрелки. В вакуумметрах перемещение стрелки может происходить как по часовой стрелке, так и против. Отличительной особенностью мановакуумметра является шкала, которая выполняется с нулем в средней части. Шкала, расположенная слева от нуля, служит для измерения вакуума, а шкала, расположенная справа,— для измерения избыточного давления. Диапазоны измерений манометров от 0 - 0,1 МПа до 0 - 10^3 МПа; вакуумметров — от - 0,1 до 0 МПа. Классы точности приборов: 0,4(0,5); 0,6; 1,0; 1,5(1,6); 2,5; 4,0.

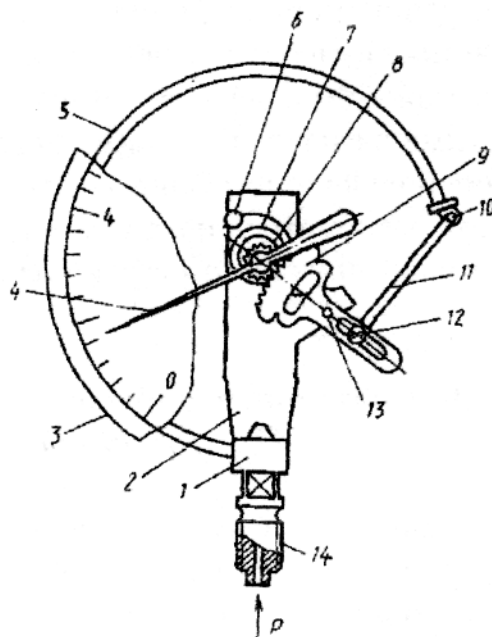


Рисунок 14.118 - Схема манометра с одновитковой трубчатой пружиной

Наряду с рассмотренными приборами, оснащенными одинаковой трубчатой пружиной, в практике измерения давления и разрежения получили широкое распространение манометры и вакуумметры, снабженные электроконтактными сигнализирующими устройствами. Эти средства измерений давления получили название электроконтактных. Класс точности электроконтактных манометров и вакуумметров 1,5. Погрешность срабатывания сигнализирующего устройства $\pm 2,5 \%$.

14.2.3.2 Измерительные приборы с многовитковой трубчатой пружиной

Благодаря большому числу витков перемещение свободного конца многовитковой трубчатой пружины и развиваемые ею усилия достигают значений, позволяющих осуществлять показания и запись измеряемого давления или разрежения. Ниже, на рисунке 14.119 показана схема манометра с многовитковой трубчатой пружиной. Измеряемое давление через штуцер 1 по капилляру 8 подается во внутреннюю полость многовитковой трубчатой пружины 7. Один конец пружины прикреплен к кронштейну 6, а другой — соединен с осью 9. Под действием давления пружина раскручивается, что сопровождается вращением оси 9 и находящегося на ней рычага 10, вращение которого через тягу 13 передается рычагу 4, находящемуся на одной оси 5 со стрелкой 3. На конце стрелки укреплено перо 14, перемещающееся по дисковой диаграмме 2, вращение которой осуществляется электродвигателем или часовым механизмом.

Для регулировки размаха стрелки предусмотрен ползун 11 с винтом 12. Класс точности показывающих и самопишущих приборов с многовитковой

трубчатой пружиной 1,0; 1,5. Диапазоны измерений манометров от 0—0,6 МПа до 0—160 МПа; вакуумметров—от —0,06—0 МПа до—0,1—0 МПа.

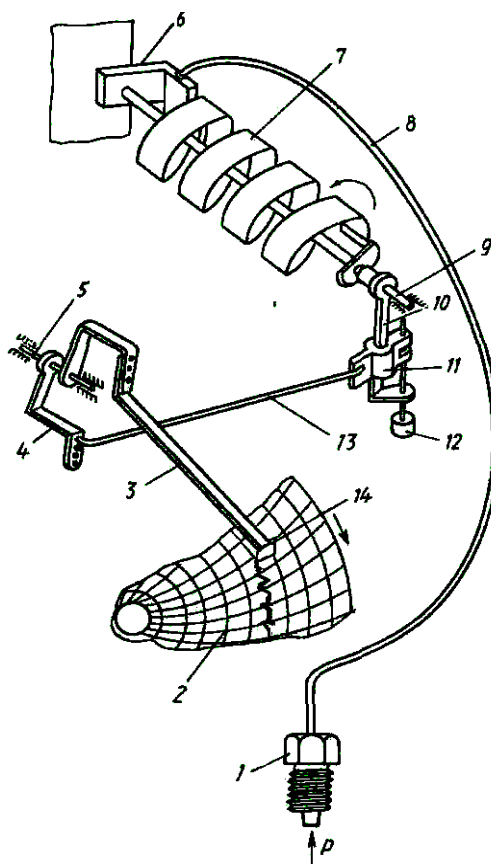


Рисунок 14.119 – Схема манометра с многовитковой трубкой

14.2.3.3 Измерительные приборы с сильфонным чувствительным элементом

Приборы этого типа предназначены для измерения избыточного давления, разрежения и разности давлений. Их выполняют показывающими и самопишущими. Схема самопишущего сильфонного манометра показана на рисунке 14.120. Измеряемое давление через штуцер 11 подается в камеру 10, где расположен деформационный чувствительный элемент – сильфон 9. Для увеличения жесткости сильфона внутри него расположена винтовая пружина 8. Под действием давления сильфон деформируется и дно его поднимает шток 7, жестко связанный с двухплечим рычагом 6, последний через систему рычагов 5, 4, 3 поворачивает ось 12 и укрепленный на ней П-образный рычаг 2. К П-образному рычагу прикреплена стрелка 1 с пером. Запись измеряемого давления производится на дисковой диаграмме, привод которой осуществляется с помощью синхронного двигателя или часового механизма.

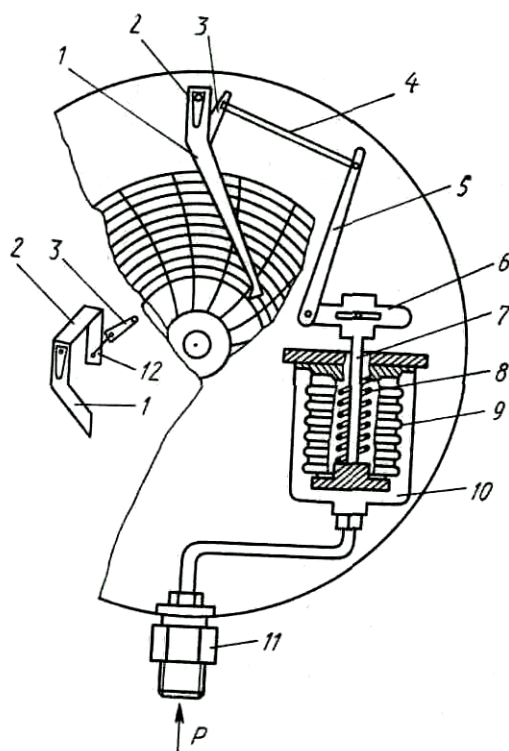


Рисунок 14.120 – Схема самопишущего манометра с сифонным чувствительным элементом

Верхний предел измерений сифонных приборов ограничен давлениями 0,025—0,4 МПа. Классы точности сифонных манометров избыточного давления, вакуумметров и мановакуумметров: 1,5; 2,5. Для измерения разности давлений и расхода жидких и газообразных сред широкое применение получили сифонные дифманометры. На рисунке 14.121 показана схема сифонного дифманометра.

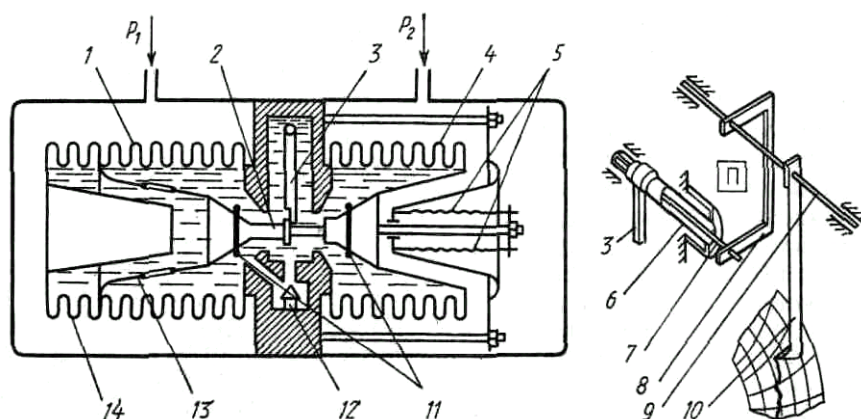


Рисунок 14.121 - Схема самопишущего сифонного дифманометра

Под действием измеряемого перепада давления рабочий сильфон 7, расположенный в плюсовой камере (камера, в которую подается большее давление), сжимается, что приводит к вытеснению рабочей жидкости, заполняющей внутреннюю полость дифманометра, во внутреннюю полость дифманометра, во внутреннюю полость рабочего сильфона 4. Деформация сильфонов вызывает перемещение штока 2 и изменение натяга противодействующих пружин 5. Перемещение штока прекращается, когда усилие деформации сильфонов уравнивается усилием натяга противодействующих пружин. В процессе перемещения штока 2 последний поворачивает рычаг 3 против часовой стрелки, который закручивает торсионную трубку 6. Одновременно с торсионной трубкой поворачивается ось 7, жестко связанная с рычагом 8. Перемещение рычага 8 передается оси 9, на которой укреплен стрелка 10. С целью исключения влияния изменения температуры окружающего воздуха на показания прибора последний снабжен температурным компенсатором, выполненным в виде трех дополнительных гофр 14. Внутренние полости термокомпенсатора и сильфона соединены между собой отверстиями в разделительном стакане 13. В процессе термокомпенсации жидкость из полости термокомпенсатора перетекает в полость рабочего сильфона. Резиновые кольца 11 служат для герметизации полостей рабочих сильфонов, когда один из сильфонов находится под воздействием односторонней перегрузки. Это позволяет предохранить сильфоны от разрушения. Клапан 12 регулирует скорость перетекания жидкости из полостей рабочих сильфонов и тем самым степень успокоения указателя прибора. Для передачи на расстояние показаний сильфонных дифманометров последние оснащаются преобразователями 12 перемещения в унифицированный токовый или пневматический сигнал. Предельные номинальные перепады давлений составляют 0,0063—0,25 МПа. Предельное допустимое рабочее избыточное давление: 6,3; 16 и 32 МПа. Классы точности сильфонных показывающих и самопишущих дифманометров 1,0 и 1,5.

Измерительные приборы с мембранным чувствительным элементом. Эти приборы предназначены для измерения атмосферного и избыточного давлений и разрежения. Из-за малости усилий, развиваемых деформационным чувствительным элементом, мембранные приборы выпускаются в основном показывающими. Принцип действия приборов состоит в преобразовании измеряемого давления или разрежения в перемещение жесткого центра мембранного чувствительного элемента, которое с помощью передаточного трибно-секторного механизма преобразуется во вращательное движение указателя. Максимальный диапазон измерений мембранных манометров 0—2,5 МПа, вакуумметров — от —0,1 до 0 МПа. Классы точности приборов 1,5 и 2,5. Кроме рассмотренных приборов выпускаются показывающие мембранные тягомеры, напоромеры и тягонапоромеры классов точности 1,5; 2,5.

14.2.3.4 Деформационные измерительные преобразователи давления, основанные на методе прямого преобразования

Выпускаемые в настоящее время измерительные преобразователи давления, основанные на методе прямого преобразования, различаются как видом деформационного чувствительного элемента, так и способом преобразования его перемещения или развиваемого им усилия в сигнал измерительной информации. Для преобразования перемещения чувствительного элемента в сигнал измерительной информации широко применяются индуктивные, дифференциально-трансформаторные, емкостные, тензорезисторные и другие преобразовательные элементы. Преобразование усилия, развиваемого чувствительным элементом, в сигнал измерительной информации осуществляется пьезоэлектрическими преобразовательными элементами.

Индуктивные измерительные преобразователи давления.

На рисунке 14.122 а показана схема измерительного преобразователя давления, оснащенного преобразовательным элементом индуктивного типа. Мембрана 1, воспринимающая давления, является подвижным якорем электромагнита 2 с обмоткой 3. Под действием измеряемого давления мембрана 1 перемещается, что вызывает изменение электрического сопротивления индуктивного преобразовательного элемента.

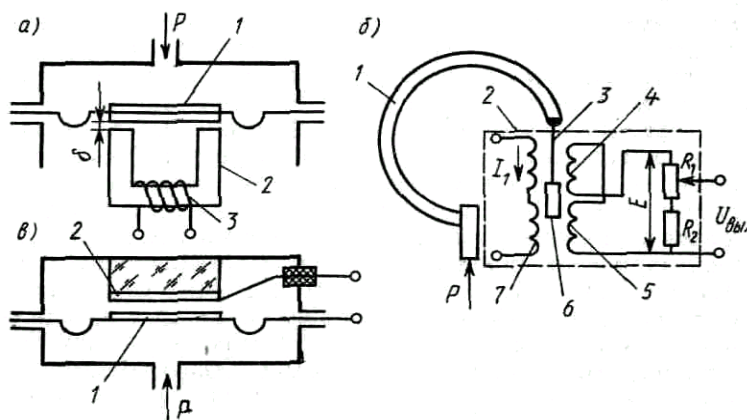


Рисунок 14.122 - Схемы измерительных преобразователей давления

Если пренебречь активным сопротивлением катушки, магнитными потоками рассеяния и потерями в сердечнике, индуктивность L преобразовательного элемента можно определить по формуле (14.25) /8/

$$L = \frac{W^2}{l_c / (\mu_c S_c) + \delta / (\mu_0 S)}, \quad (14.25) \quad /8/$$

где W - число витков катушки;

l_c , S_c - длина и площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника;

δ - длина воздушного зазора;

μ_c , μ_0 - магнитная проницаемость сердечника и воздуха;

S - площадь поперечного сечения воздушного участка магнитопровода.

В процессе измерения величина $l_c / (\mu_c S_c) \ll \delta / (\mu_0 S)$, поэтому выражение (14.25) можно представить в виде формулы (14.26) /8/

$$L = W^2 \mu_0 S / \delta, \quad (14.26)$$

Принимая во внимание, что величина деформации мембраны пропорциональна измеряемому давлению получаем уравнение (14.27) /8/

$$\delta = k_I P, \quad (14.27)$$

преобразуем уравнение (14.27) к виду (14.28)

$$L = W^2 \mu_0 S / (k_I P), \quad (14.28)$$

Уравнение (14.28) представляет собой статическую характеристику измерительного преобразователя давления индуктивного типа. Измерение L осуществляется обычно мостами переменного тока или резонансными LC -контурами. При давлениях 0,5—1,0 МПа толщина мембраны 0,1—0,3 мм, а при давлениях 20—30 МПа— 1,3 мм. Рабочее перемещение мембраны составляет сотые доли миллиметра. Основная погрешность индуктивных преобразователей давления $\pm (0,2-5) \%$, постоянная времени $(2,2-3) 10^{-4}$ с.

Дифференциально-трансформаторные измерительные преобразователи давления.

Измерительный преобразователь давления дифференциально-трансформаторного (ДТ) типа (рисунке 14.122 б) содержит деформационный чувствительный элемент 1 и ДТ-преобразовательный элемент 2. Преобразовательный элемент представляет собой каркас из диэлектрика, на котором размещены катушка с первичной обмоткой 7, состоящей из двух секций, намотанных согласно, двух секций 4, 5 вторичной обмотки, включенных встречно. Внутри канала катушки расположен подвижный сердечник 6 из магнитомягкого материала, связанный с пружиной 1 тягой 3.

К выходу вторичной обмотки подключен делитель, состоящий из регулируемого R_1 и постоянного R_2 резисторов. Делитель используется при настройке преобразователя на заданный диапазон. Путем изменения сопротивления R_1 можно изменять пределы измерений на $\pm 25 \%$.

Формирование выходного сигнала ДТ-преобразовательного элемента осуществляется следующим образом. При протекании по первичной обмотке тока I_1 возникают магнитные потоки, пронизывающие обе секции вторичной

обмотки и индуцирующие в них ЭДС e_1 и e_2 . Значения этих ЭДС связаны с взаимными индуктивностями M_1 и M_2 между первичной обмоткой и каждой из секций вторичной обмотки соотношениями (14.29) /8/

$$e_1 = 2 \pi f I_1 M_1; \quad e_2 = 2 \pi f I_1 M_2, \quad (14.29)$$

где f — частота тока I_1 .

При встречном включении обмоток секций 4 и 5 получаем соотношение (14.30) /8/

$$E = e_1 - e_2 = 2 \pi f I_1 (M_1 - M_2) = 2 \pi f I_1 M, \quad (14.30)$$

где M — взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками.

Для унифицированного ДТ-преобразовательного элемента, имеющего во вторичной обмотке резисторы R_1 и R_2 , выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ определяется взаимной индуктивностью $M_{\text{вых}}$ между первичной обмоткой и выходной цепью и может быть представлен в виде формулы (14.31)

$$U_{\text{вых}} = 2 \pi f I_1 M_{\text{вых}}, \quad (14.31)$$

Величина $M_{\text{вых}}$ связана с перемещением δ сердечника b зависимостью (14.32)

$$M_{\text{вых}} = M_{\text{max}} \frac{\delta}{\delta_{\text{max}}}, \quad (14.32)$$

где M_{max} — максимальное значение взаимной индуктивности между первичной обмоткой и выходной цепью преобразователя, соответствующее максимальному δ_{max} перемещению сердечника.

Решая совместно уравнения (14.31) и (14.32), получим статическую характеристику унифицированного ДТ-преобразователя перемещения (14.33) /8/

$$U_{\text{вых}} = \frac{2 \pi f I_1 M_{\text{max}}}{\delta_{\text{max}}} \delta, \quad (14.33)$$

В настоящее время разработаны ДТ-преобразовательные элементы с полным ходом сердечника 1,6, 2,5 и 4 мм. Преобразователи имеют унифицированный сигнал в виде напряжения переменного тока, изменяющегося в диапазоне $-1 \div 0 \div +1$ В. Знак «минус» указывает на изменение фазы сигнала. Указанным значениям выходного сигнала

соответствуют изменения взаимной индуктивности ДТ преобразовательного элемента — $10 \div 0 \div 10$ мГн.

Преобразование измеряемого давления в электрический сигнал $U_{\text{вых}}$ рассматриваемым преобразователем давления осуществляется путем преобразования давления в деформацию (перемещение) ЧЭ, жестко связанного с сердечником b , и последующего преобразования перемещения сердечника b в электрический сигнал ДТ-преобразовательным элементом. Статическая характеристика преобразователя давления ДТ-типа может быть получена путем совместного решения уравнения (14.23) и уравнения (14.24) /8/

$$\delta = k P, \quad (14.24)$$

где δ —деформация ЧЭ;

k —коэффициент преобразования.

Преобразователи давления ДТ-типа работают в комплекте с дифференциально-трансформаторными вторичными приборами. Классы точности ДТ-преобразователей давления 1,0 и 1,5.

Для измерения перепада давления разработаны мембранные дифманометры с ДТ-преобразовательным элементом, осуществляющим преобразование перемещения мембранного блока в сигнал измерительной информации. Классы точности преобразователей перепада давления 1,0 и 1,5. Время установления выходного сигнала не более 1 с.

14.2.3.5 Емкостные измерительные преобразователи давления

Схема измерительного преобразователя давления, оснащенного емкостным преобразовательным элементом, приведена на рисунке 20 в. Измеряемое давление воспринимается металлической мембраной 1, являющейся подвижным электродом емкостного преобразовательного элемента. Неподвижный электрод 2 изолируется от корпуса с помощью кварцевых изоляторов. Зависимость емкости C преобразовательного элемента от перемещения δ мембраны 1 имеет вид (14.25) /8/

$$C = \varepsilon S / (\delta - \delta_0) \quad (14.25)$$

где ε —диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей меж-электродный зазор;

S —площадь электродов;

δ_0 —расстояние между электродами при давлении, равном нулю.

Для преобразования C в сигнал измерительной информации обычно используют мосты переменного тока либо резонансные LC -контуры. Емкостные преобразователи давления применяют для измерения давления до 120 МПа. Толщина мембраны 0,05—1 мм. Преобразователи давления данного

типа используются для преобразования быстро изменяющихся давлений. Постоянная времени преобразователя 10^{-4} с.

Основная погрешность $\pm (0,2-5) \%$.

Тензорезисторные измерительные преобразователи давления. Измерительные преобразователи давления, оснащенные преобразовательными элементами тензорезисторного типа (от лат. *tendere* — натягивать) получили название тензорезисторных измерительных преобразователей давления. Преобразователи давления этого вида представляют собой деформационный ЧЭ, чаще всего мембрану, на которую наклеиваются или напыляются тензорезисторы. В основе принципа работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, суть которого состоит в изменении сопротивления проводников и полупроводников при их деформации. Связь между изменением сопротивления тензорезистора и его деформацией устанавливается соотношением (14.26) /8/

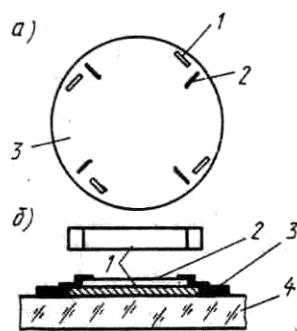
$$\frac{\Delta R}{R} = k_{\tau} \frac{\Delta l}{l}, \quad (14.26)$$

где $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления тензорезистора;

k_{τ} — постоянный коэффициент, определяемый материалом тензорезистора;

$\Delta l/l$ — относительное изменение длины тензорезистора.

Получили распространение проволочные и фольговые тензорезисторы, изготавливаемые из проводников типа манганина, нихрома, константана, а также полупроводниковые тензорезисторы, изготавливаемые из кремния и германия *p*- и *n*-типов. Сопротивление тензорезисторов, изготавливаемых из проводников, составляет 30 - 500 Ом, а сопротивление полупроводниковых тензорезисторов от $5 \cdot 10^{-2}$ - 10 кОм. Совершенствование технологии изготовления полупроводниковых тензорезисторов создало возможность изготавливать тензорезисторы непосредственно на кристаллическом элементе, выполненном из кремния или сапфира. Упругие элементы кристаллических материалов обладают упругими свойствами, приближающимися к идеальным. Сцепление тензорезистора с мембраной за счет молекулярных сил позволяют отказаться от использования клеющих материалов и улучшить метрологические характеристики преобразователей. На рисунке 14.123 а показана сапфировая мембрана 3 с расположенными на ней однополосковыми тензорезисторами *p*-типа с положительной 1 и отрицательной 2 чувствительностями. Положительной чувствительностью обладает тензорезистор, у которого отношение $\Delta R/R > 0$, если же $\Delta R/R < 0$ — чувствительность отрицательна. Структура однополоскового тензорезистора приведена на рисунке 14.123 б.



1—тензорезистор; 2—защитное покрытие; 3—металлизированные токоведущие дорожки; 4—упругий элемент преобразователя (сапфировая мембрана).

Рисунок 14.123 - Схемы тензорезисторных $\Delta R/R$ и даже термокомпенсационные элементы чувствительных элементов.

Тензорезисторы можно располагать на мембране так, что при деформации они будут иметь разные по знаку приращения сопротивления. Это позволяет создавать мостовые схемы, в каждое из плеч которого включаются тензорезисторы с соответствующим значением.

На рисунке 14.124 а показана схема тензорезисторного измерительного преобразователя разности давления. Мембранный тензомодуль 4 представляет собой металлическую мембрану, к которой сверху припаяна сапфировая мембрана с напыленными четырьмя кремниевыми тензорезисторами, образующими плечи неравновесного моста. Тензомодуль закреплен на основании 2 и отделен от измеряемой среды двумя разделительными металлическими мембранами 1 и 3. Замкнутые полости между тензомодулем и мембранами заполнены полиметилсилоксановой жидкостью. Измеряемая разность давлений $P_1 - P_2$ воздействует на тензомодуль через указанные мембраны и жидкость. Через герметичные выводы 5 тензомодуль подключается к встроенному электронному устройству 6. С помощью этого устройства изменение сопротивления тензорезисторов преобразуется в унифицированный токовый выходной сигнал (0—5, 0—20 или 4—20 мА), который передается по искробезопасной двухпроводной линии дистанционной передачи к блоку питания 7. Последний устанавливается во взрывобезопасном помещении и обеспечивает питание первичного преобразователя по двухпроводной линии. По этой же линии одновременно передается выходной токовый сигнал.

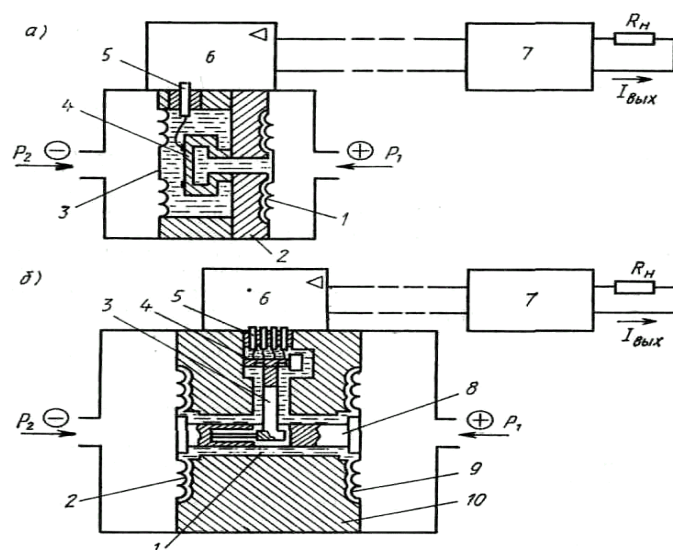


Рисунок 14.124 - Схемы тензорезисторных измерительных преобразователей разности давлений с унифицированным токовым выходным сигналом

Наряду с указанной функцией блок питания повышает мощность выходного сигнала до уровня, необходимого для подключения внешней нагрузки R_n , и формирует заданный уровень выходного сигнала (0—5, 0—20 или 4—20 мА). В тензорезисторных преобразователях избыточного давления, абсолютного давления и разрежения используются измерительные блоки, аналогичные рассмотренным. Отличие состоит в том, что измерительный преобразователь подключается к объекту «плюсовой» камерой, а «минусовой» сообщается с атмосферой. У измерительных преобразователей абсолютного давления «минусовая» камера вакуумирована.

Тензорезисторный преобразователь давления с тензомодулем рычажно-мембранного типа показан на рисунке 14.124 б. Тензомодуль рычажно-мембранного типа 3 размещен в заполненной полиметилсилоксановой жидкостью замкнутой полости 1 и отделен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 2 и 9. Мембраны по наружному контуру приварены к основанию 10 и соединены между собой центральным штоком 8, который связан с концом рычага тензомодуля. Разность давлений вызывает прогиб мембран 2 и 9 тензомодуля 3, что сопровождается изменением сопротивления тензорезисторов 4. Электрический сигнал с тензомодуля через герметичные выводы 5 подается во встроенное электронное устройство 6, которое связано с блоком питания 7. Назначение блока питания аналогично рассмотренному.

Классы точности тензорезисторных измерительных преобразователей избыточного давления, разрежения и разности давлений 0,6; 1,0; 1,5. Время установления выходного сигнала при скачкообразном изменении измеряемого параметра 0,5 и 2,5 с. Диапазоны измерений: избыточного давления—от 0 —

10^{-3} до 0 - 60 МПа; разрежения - от - 1 - 0 до - 10 - 0 кПа; абсолютного давления - от 0 - 2,5 кПа до 0 - 2,5 МПа; разности давлений - от 0 - 1 кПа до 0 - 2,5 МПа.

Кроме рассмотренных разработана модификация тензорезисторного преобразователя, предназначенного для измерения избыточного давления: Преобразователь имеет унифицированные токовые сигналы 0—5, 0—20, 4—20 мА. Классы точности преобразователя 0,25; 0,5; 1,0. Диапазоны измерений избыточного давления от 0 - 2,5 кПа до 0 - 100 МПа.

Пьезоэлектрические измерительные преобразователи давления.

В основу работы этих преобразователей положено преобразование измеряемого давления в усилие посредством деформационного, чувствительного элемента и последующего преобразования этого усилия в сигнал измерительной информации пьезоэлектрическим преобразовательным элементом. Принцип действия пьезоэлектрического преобразовательного элемента основан на пьезоэлектрическом эффекте, наблюдаемом у ряда кристаллов, таких, как кварц, турмалин, титанат бария и др. Суть пьезоэлектрического эффекта состоит в том, что если кварцевые пластины X-среза подвергнуть сжатию силой N , то на ее поверхности возникнут заряды разных знаков.

Значение заряда Q связано с силой N соотношением (14.27) /8/

$$Q = k N, \quad (14.27)$$

где k — пьезоэлектрическая постоянная.

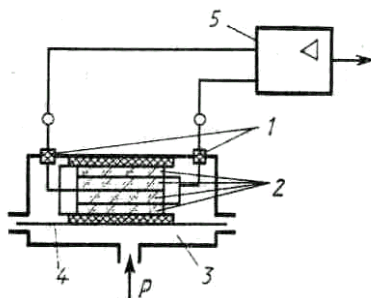


Рисунок 14.125 – Схема пьезоэлектрического измерительного преобразователя

Значение k не зависит от размера пластины и определяется природой кристалла. Для кварца $k = 2,110^{-12}$ Кл/Н.

На рисунке 14.125 показана схема пьезоэлектрического измерительного преобразователя давления. Измеряемое давление преобразуется мембраной 4 в усилие, вызывающее сжатие столбиков кварцевых пластин 2 диаметром 5 мм и толщиной 1 мм. Возникающий электрический заряд Q , через выводы 1 подается на электронный усилитель 5, обладающий большим входным

сопротивлением— 10^{13} Ом. Значение заряда связано с измеряемым давлением P зависимостью (14.28) /8/

$$Q = k F P, \quad (14.28)$$

где F — эффективная площадь мембраны.

Для уменьшения инерционности преобразователя объем камеры 3 минимизируют.

Так как частота собственных колебаний системы «мембрана — кварцевые пластины» составляет десятки кГц, то измерительные преобразователи этого типа обладают высокими динамическими характеристиками, что обусловило их широкое применение при контроле давления в системах с быстропротекающими процессами. Чувствительность пьезоэлектрических измерительных преобразователей давления может быть повышена путем применения нескольких, параллельно включенных кварцевых пластин и увеличения эффективной площади мембраны. Верхние пределы измерений пьезоэлектрических преобразователей давления с кварцевыми, чувствительными элементами 2,5 - 100 МПа. Классы точности 1,5; 2,0. Из-за утечки заряда с кварцевых пластин преобразователи давлений этого типа не используются для измерения статических давлений.

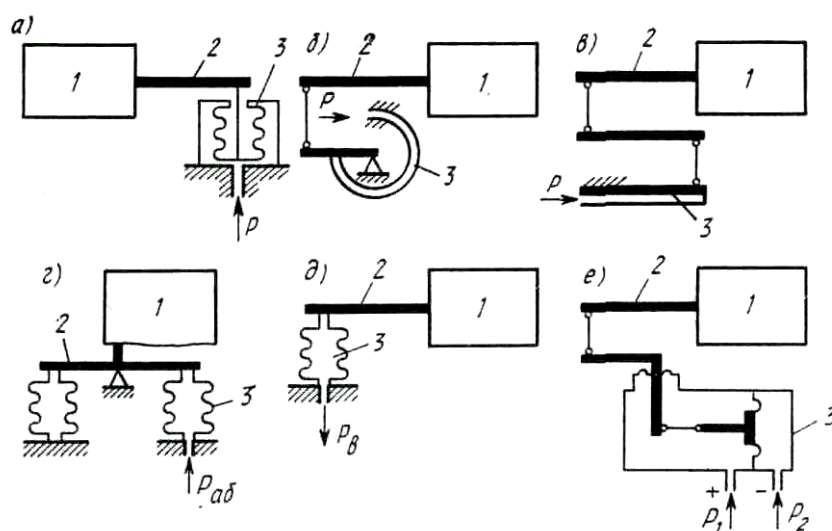
14.2.3.6 Деформационные измерительные преобразователи основанные на методе уравнивающего преобразования

Измерительные преобразователи давления этого типа получили широкое применение в автоматизированных системах управления технологическими процессами ряда отраслей промышленности. Они входят в ГСП и имеют унифицированные пневматические и электрические токовые выходные сигналы.

Отличительной особенностью этих измерительных преобразователей является блочный принцип построения с использованием унифицированных преобразователей «сила—давление» или «сила—ток». Это позволяет создавать на их базе не только измерительные преобразователи избыточного давления, но и разности давлений и разрежения. Работа первичных измерительных преобразователей, основанных на методе уравнивающего преобразования, подробно изложена в /8/. При рассмотрении работы указанных первичных измерительных преобразователей необходимо принять во внимание, что измеряемым параметром P в данном случае является давление P , а чувствительным элементом—один из рассмотренных деформационных чувствительных элементов. На рисунке 14.126 показаны схемы присоединения деформационных ЧЭ к унифицированному преобразователю «сила — давление».

По схемам рисунка 14.126 а—в конструируются измерительные преобразователи избыточного давления, оснащенные соответственно сильфоном, одновитковой трубчатой пружиной или прямолинейной трубчатой

пружиной. Измерительные преобразователи абсолютного давления конструируются по схеме рисунка 14.126 г, разрежения — по схеме рисунка 14.126 д, разности давлений — рисунку 14.126 е. Подсоединение деформационных ЧЭ к унифицированным преобразователям «сила — ток» осуществляется по аналогичным схемам. Классы точности пневматических измерительных преобразователей давления: 0,5; (0,6); 1,0; 1,5; разности давлений: 0,6; 1,0; 1,5; 2,5; разрежения: 1,0; 1,5. Классы точности измерительных преобразователей давления, разности давлений, разрежения с унифицированным токовым сигналом : 0,5 (0,6); 1,0; 1,5 .



1-унифицированный преобразователь; 2- рычаг;
3 – деформационный ЧЭ

Рисунок 14.126 - Схемы присоединения деформационных чувствительных элементов к унифицированному преобразователю «сила — давление»

14.3 Измерения тепловых величин

14.3.1 Общие сведения

Температурой называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. Практически все технологические процессы, различные свойства вещества зависят от температуры.

В отличие от таких физических величин, как длина, масса и др. температура является не экстенсивной (параметрической), а интенсивной (активной) величиной. Так, если разделить на две равные части однородное тело, то его масса делится пополам. Температура, являющаяся интенсивной величиной, таким свойством аддитивности не обладает, т. е. для системы, находящейся в термическом равновесии, любая микроскопическая часть системы имеет одинаковую температуру. Поэтому не представляется возможным создание эталона температуры, наподобие того, как создаются

эталонны экстенсивных величин. Измерять температуру можно только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению. Эти свойства тел называют термометрическими. К ним относят длину, объем, плотность, термоЭДС, электрическое сопротивление и т. д. Вещества, характеризующиеся термометрическими свойствами, называют термометрическими. Средство измерений температуры называют термометром. Для создания термометра необходимо иметь температурную шкалу.

14.3.2 Температурные шкалы

Температурной шкалой называют конкретную функциональную числовую связь температуры со значениями измеряемого термометрического свойства. В связи с этим представляется возможным построение температурной шкалы на основе выбора любого термометрического свойства. В то же время нет ни одного термометрического свойства, которое линейно изменяется с изменением температуры и не зависит от других факторов в широком интервале измерения температур. Первые шкалы появились в XVIII в. Для построения их выбирались две опорные, или реперные точки t_1 и t_2 , представляющие собой температуры фазового равновесия чистых веществ. Разность температур $t_2 - t_1$ называют основным температурным интервалом.

Фаренгейт (1715 г.), Реомюр (1776 г.) и Цельсий (1742 г.) при построении шкал основывались на допущении линейной связи между температурой t и термометрическим свойством, в качестве которого использовалось расширение объема жидкости V (формула 14.27) /8/

$$t = a + bV, \quad (14.27)$$

где a и b — постоянные коэффициенты.

Подставив в уравнение (14.27) $V = V_1$ при $t = t_1$ и $V = V_2$ при $t = t_2$, после преобразований получим уравнение (14.28) температурной шкалы /8/

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{V_2 - V_1}(V - V_1), \quad (14.28)$$

В шкалах Фаренгейта, Реомюра и Цельсия точке плавления льда t_1 соответствовали $+32$, 0 и 0 °, а точке кипения воды t_2 — 212 , 80 и 100 °. Основной интервал $t_2 - t_1$ в этих шкалах делится соответственно на $N = 180$, 80 и 100 равных частей, и $1/N$ часть каждого из интервалов называют градусом Фаренгейта - $t^\circ F$, градусом Реомюра - $t^\circ R$ и градусом Цельсия— $t^\circ C$. Таким образом, для шкал, построенных по указанному принципу, градус не является единицей измерения, а представляет собой единичный промежуток - масштаб шкалы.

Для пересчета температуры из одной указанной шкалы в другую используют соотношение (14.29)

$$t\text{ }^{\circ}\text{C} = 1,25\text{ }^{\circ}\text{R} = -(5/9)(t\text{ }^{\circ}\text{F} - 32), \quad (14.29)$$

Позднее было выяснено, что показания термометров, имеющих разные термометрические вещества (например, ртуть, спирт и др.), использующих одно и то же термометрическое свойство и равномерную градусную шкалу, совпадают лишь в реперных точках, а в других точках показания расходятся. Последнее особенно заметно при измерении температур, значения которых расположены далеко от основного интервала.

Указанное обстоятельство объясняется тем, что связь между температурой и термометрическим свойством на самом деле нелинейна и эта нелинейность различна для различных термометрических веществ. В частности, в рассматриваемом случае нелинейность между температурой и изменением объема жидкости объясняется тем, что температурный коэффициент объемного расширения жидкости сам изменяется от температуры и это изменение различно для различных капельных жидкостей.

На основе описанного принципа построения может быть получено любое количество температурных шкал, значительно различающихся между собой. Такие шкалы называют условными, а масштабы этих шкал - условными градусами. Проблема создания температурной шкалы, не зависящей от термометрических свойств веществ, была решена в 1848 г. Кельвином, а предложенная им шкала была названа термодинамической. В отличие от условных температурных шкал термодинамическая температурная шкала является абсолютной.

Термодинамическая шкала температур основана на использовании второго закона термодинамики. В соответствии с этим законом коэффициент полезного действия η тепловой машины, работающей по обратимому циклу Карно, определяется только температурами нагревателя T_H и холодильника T_X и не зависит от свойств рабочего вещества, таким образом коэффициент полезного действия вычисляют по формуле (14.30) /8/

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H} = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H}, \quad (14.30)$$

где Q_H и Q_X - соответственно количество теплоты, полученное рабочим веществом от нагревателя и отданное холодильнику.

Кельвином было предложено для определения температуры использовать равенство (14.31) /8/

$$T_H/T_X = Q_H/Q_X, \quad (14.31)$$

Следовательно, используя один объект в качестве нагревателя, а другой — в качестве холодильника и проводя между ними цикл Карно, можно определить отношение температур объектов путем измерения отношения теплоты, взятой от одного объекта и отданной другому. Полученная шкала температур не зависит от свойств рабочего (термометрического) вещества и называется абсолютной шкалой температур. Чтобы абсолютная температура (а не только отношение) имела определенное значение, было предложено принять разность термодинамических температур между точками кипения воды T_{KB} и таяния льда $T_{ТЛ}$, равной 100° . Принятие такого значения разности преследовало цель сохранения преемственности числового выражения термодинамической температурной шкалы от стоградусной температурной шкалы Цельсия. Таким образом, обозначая количество теплоты, полученной от нагревателя (кипящая вода) и отдаваемой холодильнику (тающий лед), соответственно через Q_{KB} и $Q_{ТЛ}$ и приняв $T_{KB} - T_{ТЛ} = 100$, используя (14.31), получим равенство (14.32) и (14.33)

$$T_{KB} = \frac{Q_{KB}}{Q_{KB} - Q_{ТЛ}} \cdot 100, \quad (14.32)$$

$$T_{ТЛ} = \frac{Q_{ТЛ}}{Q_{KB} - Q_{ТЛ}} \cdot 100, \quad (14.33)$$

Для любой температуры T нагревателя при неизменном значении температуры $T_{ТЛ}$ холодильника и количества теплоты $Q_{ТЛ}$, отдаваемой ему рабочим веществом машины Карно, будем иметь равенство (14.34) /8/

$$T = \frac{Q}{Q_{KB} - Q_{ТЛ}} 100, \quad (14.34)$$

Выражение (14.34) является уравнением **стоградусной термодинамической шкалы температур** и показывает, что значение температуры T по данной шкале линейно связано с количеством теплоты Q , полученной рабочим веществом тепловой машины при совершении ею цикла Карно, и, как следствие, не зависит от свойств термометрического вещества. За один градус термодинамической температуры принимают такую разность между температурой тела и температурой таяния льда, при которой производимая по обратимому циклу Карно работа равна $1/100$ части работы, совершаемой в цикле Карно между температурой кипения воды и таяния льда (при условии, что в обоих циклах количество теплоты, отдаваемой холодильнику, одинаково). Из выражения (14.30) следует, что при максимальном значении $\eta = 1$ должна быть равна нулю T_X . Эта наименьшая температура была названа Кельвином абсолютным нулем. Температуру по

термодинамической шкале обозначают T К. Если в выражение, описывающее газовый закон Гей-Люссака: $P_t = P_o(1 + \alpha t) = P_o\alpha(\alpha^{-1} + t)$ (где P_o — давление при $t=0$ °C; α — температурный коэффициент давления), подставить значение температуры, равное $-\alpha^{-1}$, то давление газа P_t станет равным нулю. Естественно предположить, что температура $t = -\alpha^{-1}$, при которой обеспечивается предельное минимальное давление газа, сама является минимально возможной, и по абсолютной шкале Кельвина принята за нуль. Следовательно, абсолютная температура $T = \alpha^{-1} + t$.

Из закона Бойля—Мариотта известно, что для газов температурный коэффициент давления α равен температурному коэффициенту объемного расширения β . Экспериментально было найдено, что для всех газов при давлениях, стремящихся к нулю, в интервале температур 0—100 °C температурный коэффициент объемного расширения $\beta = 1/273,15$.

Таким образом, нулевое значение абсолютной температуры соответствует $t = -\alpha^{-1} = -\beta^{-1} = -273,15$ °C. Температура таяния льда по абсолютной шкале составит $T_o = 273,15$ К. Любая температура в абсолютной шкале Кельвина может быть определена как $T = 273,15 \text{ К} + t$ (где t температура в °C). Необходимо отметить, что один градус Кельвина (1 К) соответствует одному градусу Цельсия (1 °C), так как обе шкалы базируются на одинаковых реперных точках. Термодинамическая шкала температур, основанная на двух реперных точках (температура таяния льда и кипения воды), обладала недостаточной точностью измерения. Практически трудно воспроизвести температуры указанных точек, так как они зависят от изменения давления, а также от незначительных примесей в воде. Кельвин и независимо от него Д. И. Менделеев высказали соображения о целесообразности построения термодинамической шкалы температур по одной реперной точке. Консультативный комитет по термометрии Международного комитета мер и весов в 1954 г. принял рекомендацию о переходе к определению термодинамической шкалы с использованием одной реперной точки — тройной точки воды (точки равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах), которая легко воспроизводится в специальных сосудах с погрешностью не более 0,0001 К. Температура этой точки принята равной 273,16 К, т.е. выше температуры точки таяния льда на 0,01 К. Такое число выбрано для того, чтобы значения температур по новой шкале практически не отличались от старой шкалы Цельсия с двумя реперными точками. Второй реперной точкой является абсолютный нуль, который экспериментально не реализуется, но имеет строго фиксированное положение. В 1967 г. XIII Генеральная конференция по мерам и весам уточнила определение единицы термодинамической температуры в следующей редакции: **«Кельвин—1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды»**. Термодинамическая температура может быть также выражена в градусах Цельсия: $t = T - 273,15$ К. Использование второго закона термодинамики, предложенное Кельвином с целью установления понятия температуры и построения абсолютной термодинамической температурной шкалы, не

зависящей от свойств термометрического вещества, имеет огромное теоретическое и принципиальное значение. Однако реализация указанной шкалы с использованием в качестве термометра тепловой машины, работающей по обратимому циклу Карно, практически неосуществима.

Термодинамическая температура эквивалентна газотермической, используемой в уравнениях, описывающих законы идеальных газов. Газотермическую температурную шкалу строят на основе газового термометра, в котором в качестве термометрического вещества используется газ, приближающийся по свойствам к идеальному газу. Таким образом, газовый термометр является реальным средством для воспроизведения термодинамической температурной шкалы. Газовые термометры бывают трех типов: постоянного объема, постоянного давления и постоянной температуры. Обычно применяют газовый термометр постоянного объема (рисунок 14.127), в котором изменение температуры газа пропорционально изменению давления. Газовый термометр состоит из баллона 1 и соединительной трубки 2, заполненных через вентиль 3 водородом, гелием или азотом (для высоких температур). Соединительная трубка 2 подсоединена к трубке 4 двухтрубного манометра, у которого трубку 5 можно перемещать вверх или вниз благодаря гибкому соединительному шлангу 6. При изменении температуры объем системы, заполненной газом, изменяется, и для приведения его к первоначальному значению трубку 5 вертикально перемещают до тех пор, пока уровень ртути в трубке 4 не совпадет с осью $X-X$. При этом столб ртути в трубке 5, отсчитанный от уровня $X-X$, будет соответствовать давлению газа P в баллоне.

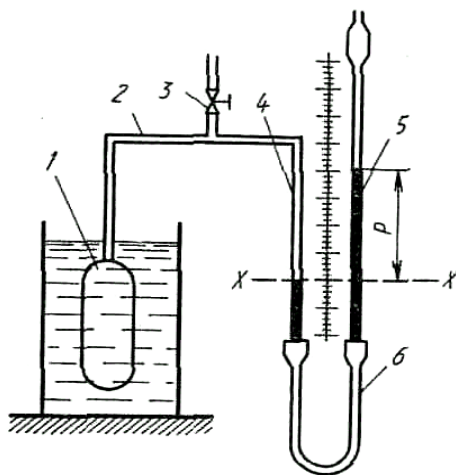


Рисунок 14.127 – Схема газового термометра

Обычно измеряемую температуру T определяют относительно некоторой точки отсчета, например по отношению к температуре тройной точки воды T_0 , при которой давление газа в баллоне будет P_0 . Искомая температура вычисляется по формуле (14.35)

$$T = T_0 \frac{P}{P_0}, \quad (14.35)$$

Газовые термометры используют в интервале $\sim 2-1300$ К. Погрешность газовых термометров находится в пределах $3 \cdot 10^{-3} \text{—} 2 \cdot 10^{-2}$ К в зависимости от измеряемой температуры. Достижение такой высокой точности измерения - сложная задача, требующая учета многочисленных факторов: отклонения свойств реального газа от идеального, наличие примесей в газе, сорбцию и десорбцию газа стенками баллона, диффузию газа через стенки, изменение объема баллона от температуры, распределение температуры вдоль соединительной трубки.

В силу большой трудоемкости работы с газовыми термометрами предпринимались попытки изыскать более простые методы воспроизведения термодинамической температурной шкалы.

На основе проведенных в различных странах исследований на VII Генеральной конференции по мерам и весам в 1927 г. было принято термодинамическую шкалу заменить **«практической» температурной шкалой** и назвать ее **международной температурной шкалой**. Эта шкала была согласована со стоградусной термодинамической шкалой настолько тесно, насколько позволял уровень знаний того времени.

Для построения международной температурной шкалы было выбрано шесть воспроизводимых реперных точек, значения температуры которых по термодинамической шкале были тщательно измерены в различных странах с помощью газовых термометров и приняты наиболее достоверные результаты. С помощью реперных точек градуируются эталонные приборы для воспроизведения международной температурной шкалы. В интервалах между реперными точками значения температур рассчитывают по предлагаемым интерполяционным формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и температурой по международной шкале. В 1948, 1960 и 1968 гг. в положения о международной температурной шкале был внесен ряд уточнений и дополнений, так как на основе усовершенствованных методов измерений были обнаружены отличия этой шкалы от термодинамической, особенно в области высоких температур, а также в связи с необходимостью продлить температурную шкалу до более низких температур. В настоящее время действует принятая на XIII конференции по мерам и весам усовершенствованная шкала под названием «международная практическая температурная шкала 1968» (МПТП—68). Определение «практическая» указывает, что эта температурная шкала в общем не совпадает с термодинамической. Температуры МПТШ—68 снабжаются индексом (T_{68} или t_{68}).

МПТШ—68 базируется на 11 основных реперных точках, приведенных в таблице 9. Наряду с основными имеется 27 вторичных реперных точек, охватывающих диапазон температур от 13,956 до 3660 К (от - 259,194 до 3387 °С). Числовые значения температур, приведенные в таблице 14.4,

соответствуют термодинамической шкале и определены с помощью газовых термометров.

В качестве эталонного термометра в интервале температур от 13,81 до 903,89 К (630,74 °С - точка затвердевания сурьмы-вторичная реперная точка) принимается платиновый термопреобразователь сопротивления. Этот интервал разбит на пять подынтервалов, для каждого из которых определены интерполяционные формулы в виде полиномов до четвертой степени. В интервале температур от 903,89 до 1337,58 К используется эталонный платина-платинородиевый термоэлектрический термометр. Интерполяционной формулой, связывающей термоэлектродвижущую силу с температурой, здесь является полином второй степени.

Для температур выше 1337,58 К (1064,43°С) МПТШ—68 воспроизводится с помощью квазимонохроматического термометра с использованием закона излучения Планка.

Таблица 14.4 - Основные реперные точки МПТШ—68

Состояние равновесия	Температура		
	T_{68}, K	$t_{68}, ^\circ C$	P, Pa
Тройная точка водорода	13,81	-259,34	---
Точка кипения водорода	17,042	-256,108	33 330,6
Точка кипения водорода	20,28	-252,87	101 325
Точка кипения неона	27,102	-246,048	101 325
Тройная точка кислорода	54,361	-218,789	---
Точка кипения кислорода	90,188	-182,962	101 325
Тройная точка воды	273,16	0,01	---
Точка кипения воды	373,15	100,00	101 325
Точка затвердевания цинка	692,73	419,58	101 325
Точка затвердевания серебра	1235,08	961,93	101 325
Точка затвердевания золота	1337,58	1064,43	101 325

14.3.3 Классификация средств измерений температуры

В различных областях науки и техники применяется множество принципов и средств измерения температуры. В нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности широкое применение нашли средства измерений температуры, классификация которых в зависимости от используемого термометрического свойства и диапазона измерения, приведена в таблицу 14.5.

Таблица 14.5 - Наиболее распространенные промышленные средства измерений температуры

Термометрическое свойство	Наименование средства	Диапазон Измерений, °С
1	2	3
Изменение давления рабочего вещества при постоянном объеме	Манометрические термо-метры: газовые жидкостные	-150-600 -150-600 -50-350
Термоэлектрический эффект (термоЭДС)	Термоэлектрические преобразователи	-200-2200
Изменение электрического сопротивления	Металлические термопреобразователи сопротивления	-260-1100
	Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления	-240-300
Тепловое излучение	Пирометры излучения: квасимонохроматические спектрального отношения радиационные	700-6000 1400-2800 50-3500

14.3.4 Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего (термометрического) вещества в замкнутом объеме (термосистеме) от температуры. В соответствии с агрегатным состоянием рабочего вещества в термосистеме манометрические термометры подразделяют на газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные).

Манометрические термометры могут быть использованы для измерения температур от -150 до 600 °С. Диапазон измерения определяется наполнителем термосистемы. Термометры со специальными наполнителями (расплавленными металлами) пригодны для измерения температуры от 100 до 1000 °С.

Термосистема термометра (рисунок 14.128 а) состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической пружины 3. Чувствительный элемент термометра (термобаллон) погружается в объект измерения, и термометрическое вещество в термобаллоне достигает температуры измеряемой среды. При изменении температуры рабочего вещества в термобаллоне изменяется давление, которое через капиллярную трубку передается на пружинный манометр, являющийся измерительным прибором манометрического термометра.

Термобаллон представляет собой цилиндр, изготовленный из латуни или специальных сталей, стойких к химическому воздействию измеряемой среды. Геометрические размеры термобаллона зависят от типа термометров и от задач измерения. Так, диаметр термобаллона находится в пределах 5-30 мм, а его длина 60-500 мм. Капилляр, соединяющий термобаллон с манометрической пружиной, представляет собой медную или стальную трубку с внутренним диаметром 0,1-0,5 мм. Длина капиллярной трубки в зависимости от эксплуатационных требований может быть от нескольких сантиметров до 60 м. Медные капилляры имеют стальную защитную оболочку, предохраняющую их от повреждений при монтаже и эксплуатации.

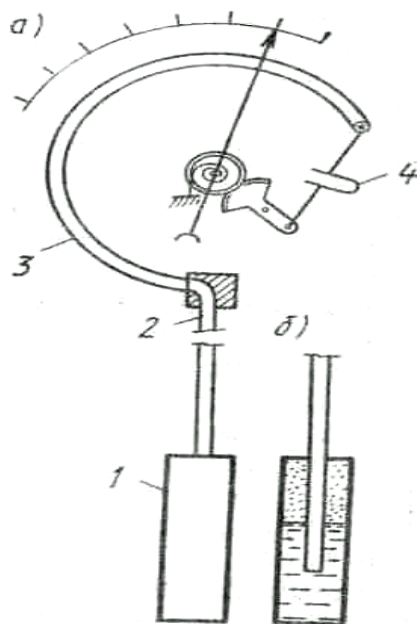


Рисунок 14.128 - Схема манометрического термометра

Для улучшения метрологических характеристик манометрических термометров к манометрическим пружинам предъявляют ряд требований. Так, с целью уменьшения температурной погрешности пружина должна иметь по возможности малый объем. Кроме того, пружина должна иметь возможность раскручиваться на большой угол и свободный ее конец должен обладать значительным тяговым усилием для механического перемещения дополнительных устройств.

В зависимости от конструкции измерительной системы манометрические системы бывают показывающими, самопишущими, бесшкальными со встроенными датчиками для дистанционной передачи показаний на расстояние.

Газовые манометрические термометры. Они предназначены для измерения температуры от -150 до +600 °С. Термометрическим веществом здесь служат гелий или азот. Принцип работы этих термометров основан на использовании закона Гей-Люссака (14.35) /8/

$$P_t = P_0(1 + \beta t), \quad (14.35)$$

где P_0 и P_t - давление газа при температурах 0 и t , °C;

β - термический коэффициент давления газа, равный $1/273,15$ или $0,00366 \text{ K}^{-1}$.

Теоретически линейная связь между P_t и t в соответствии с (14.35) строго не сохраняется для реальных систем. Это связано с тем, что с изменением температуры изменяется объем термобаллона и с изменением давления изменяется объем манометрической пружины, а также происходит массообмен между термобаллоном и капиллярной трубкой. В то же время эти изменения незначительны и практически можно считать, что шкалы газовых манометрических термометров равномерны. Подставляя в (14.35) вместо P_t и t соответственно P_H и t_H , а также P_K и t_K , после несложных преобразований получим выражение (14.36) для величины рабочего давления газового манометрического термометра /8/

$$\Delta P = P_K - P_H = P_H \frac{\beta(t_K - t_H)}{1 + \beta t_H}, \quad (14.36)$$

где P_H и P_K - давления в термосистеме, соответствующие начальному t_H и конечному t_K значениям температуры по шкале прибора.

Начальное давление заполнения системы P_H для заданного диапазона измерения температур может быть рассчитано из (14.36) при известном рабочем давлении манометрической пружины. Значение P_H в зависимости от диапазона шкалы прибора может быть различным примерно в пределах от 1 до 3 МПа. Чем больше P_H , тем больше ΔP и тем меньше влияние барометрического давления на показания прибора. Объем термобаллона V_T в газовых манометрических термометрах не зависит ни от рабочего давления, ни от пределов измерения температуры. Однако если при измерении температура, окружающая капилляр и манометрическую пружину, отличается от температуры при градуировке, то возникает дополнительная погрешность. Для уменьшения этой погрешности стремятся уменьшить отношение $(V_n - V_k)/V_T$ (где V_n и V_k — внутренние объемы пружины и капилляра), увеличивая размер термобаллона. Поэтому для газовых манометрических термометров характерны большие размеры термобаллонов (диаметр 20-30 мм, а длина 250-500 мм) и, как следствие этого, их значительная инерционность.

Погрешность от температуры окружающей среды часто компенсируют путем установки биметаллической пластины 4 (рисунок 14.128 а), расположенной между манометрической пружинной и указателем. При измерениях с повышенной точностью и при использовании длинных капилляров применяют дифференциальную систему, состоящую из основного манометрического термометра и компенсирующего (без термобаллона), капилляр которого примыкает к капилляру основного термометра. Таким

образом, на указатель прибора действует разность перемещений двух манометрических пружин, что практически исключает температурную погрешность окружающей среды.

14.3.5 Жидкостные манометрические термометры

В качестве термометрического вещества здесь используется ртуть под давлением 10-15 МПа при комнатной температуре или толуол, ксилол, пропиловый спирт, силиконовые жидкости и т. п. при давлении 0,5-5 МПа. При ртутном заполнении диапазон измерений лежит в пределах - 30-600 °С, а для органических жидкостей 150-300 °С.

Ввиду того, что жидкость практически несжимаема, объем термобаллона в жидкостных манометрических термометрах в отличие от газовых должен быть согласован со свойствами используемой манометрической пружины.

При изменении температуры в диапазоне от начальной t_H до конечной t_K из термобаллона объемом V_T вытесняется жидкость объемом ΔV_T . Изменение можно вычислить по формуле (14.37) /8/

$$\Delta V = V_T (\beta_{ж} - 3\alpha)(t_K - t_H), \quad (14.37)$$

где $\beta_{ж}$ - температурный коэффициент объемного расширения жидкости;

α - коэффициент линейного расширения материала термобаллона.

Этот вытесненный объем вследствие охлаждения от t_K до температуры окружающего воздуха t_B дойдет до значения $\Delta V_T'$, при котором давление в термосистеме изменится на ΔP , а объем манометрической пружины изменится на ΔV_M , причем величина ΔV_M должна быть равна $\Delta V_T'$. Вытесненный объем рассчитывается по формуле (14.38) /8/

$$\Delta V_M = \Delta V_T' = \frac{\Delta V_T}{1 + \beta_{ж}(t_K - t_H)}, \quad (14.38)$$

Решая (14.37) и (14.38) совместно, получим (14.39) /8/

$$V_T = \frac{\Delta V_M [1 + \beta_{ж}(t_K - t_B)]}{(\beta_{ж} - 3\alpha)(t_K - t_H)}, \quad (14.39)$$

Из выражения (14.39) следует, что объем термобаллона тем меньше, чем больше диапазон измерения термометра и увеличивается с ростом ΔV_M . Что

касается рабочего давления ΔP , то в отличие от газовых термометров в жидкостных манометрических термометрах ΔP не зависит ни от диапазона измерения $t_K - t_H$, ни от начального давления P_H для определенного наполнителя. Здесь решающее значение имеет ΔV_M , т. е. для пружин различной жесткости в одном и том же диапазоне температур будет иметь место различное рабочее давление. В силу значительного давления в системе, предохраняющего жидкость от закипания, погрешность от изменения барометрического давления в жидкостных манометрических системах отсутствует. В жидкостных манометрических термометрах, как и в газовых, имеет место погрешность от изменения температуры окружающей среды. Для уменьшения этой погрешности принимаются те же меры, которые принимались для газовых термометров. Кроме того, для компенсации указанной погрешности как для жидкостных, так и для газовых манометрических термометров, используют инварный компенсатор. Действие этого компенсатора основано на том, что в капиллярную трубку помещается проволока из инвара и рабочее вещество оказывается в кольцевом зазоре между проволокой и стенкой капилляра. Диаметр проволоки выбирают таким, чтобы при повышении температуры в капилляре приращение кольцевого зазора было тем же, что и приращение объема жидкости в зазоре.

Манометрическим жидкостным термометрам свойственна гидростатическая погрешность, вызванная различным расположением манометра относительно термобаллона по высоте. Эта погрешность может быть устранена после монтажа прибора путем смещения указателя прибора на нужное значение по шкале.

14.3.6 Конденсационные манометрические термометры

В качестве термометрического вещества в этих термометрах используются легкокипящие жидкости, в частности пропан, этиловый эфир, ацетон, толуол, хлористый метил и т. п. В зависимости от используемого рабочего вещества диапазон измерений лежит в интервале от -50 до 350 °С. Специально изготовленные конденсационные термометры применяются для измерения сверхнизких температур, например при заполнении гелием для измерения температуры от $0,8$ К. Термобаллон термометра (рисунке 14.128 б) заполнен конденсатом примерно на $0,7 - 0,75$ объема, а над конденсатом находится насыщенный пар этой же жидкости. Капилляр в этих термометрах опущен в термобаллон так, чтобы его открытый конец находился в жидкости и в том случае, когда при максимальной температуре в термобаллоне остается часть жидкости. Капилляр и манометрическая пружина заполняются обычно высококипящей жидкостью, которая служит для передачи давления от термобаллона к манометрической пружине.

Принцип работы конденсационных термометров основан на зависимости (14.40) давления P насыщенного пара низкокипящих жидкостей от температуры T

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{L}{T(V_{\text{п}} - V_{\text{ж}})}, \quad (14.40)$$

где L - скрытая теплота испарения; $V_{\text{п}}$ и $V_{\text{ж}}$ - удельные объемы соответственно пара и жидкости.

Давление в термосистеме конденсационного термометра равно давлению насыщенного пара при температуре рабочей жидкости, которая, в свою очередь, равна температуре измеряемой среды с помещенным в нее термобаллоном. Зависимость давления насыщенного пара от температуры однозначна (до критической температуры), но нелинейна, вследствие чего шкалы конденсационных термометров имеют значительную неравномерность. Для получения равномерной шкалы конденсационные термометры снабжают специальным линеаризующим устройством. Рабочее давление в конденсационных термометрах зависит только от пределов измерения и закона изменения давления насыщенного пара от температуры. В связи с тем что давление в термосистеме зависит только от измеряемой температуры, изменение температуры окружающей среды не оказывает влияния на показания прибора. Действительно, если повышается температура капилляра и манометрической пружины, то объем наполняющей их жидкости увеличивается и частично вытесняется в термобаллон, где часть объема насыщенного пара сконденсируется, и давление в термосистеме не изменится. В силу того, что термобаллон в конденсационных термометрах может быть выполнен малых размеров, эти термометры обладают меньшей инерционностью, чем другие манометрические термометры. Кроме того, эти термометры более чувствительны, так как давление насыщенного пара резко изменяется с температурой. Конденсационным термометрам присущи гидростатическая погрешность и погрешность от изменения барометрического давления. Первая из этих погрешностей компенсируется аналогично жидкостным манометрическим термометрам, а вторая имеет место лишь на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико. Манометрические термометры - достаточно простые устройства, позволяющие осуществлять автоматическую регистрацию измерений и передачу показаний на расстояние. В настоящее время Промышленностью выпускаются манометрические термометры с унифицированными пневматическим и электрическим (постоянного тока) выходными сигналами классов точности 1; 1,5; 2,5. Важное достоинство этих термометров — возможность использования их на взрывоопасных объектах. К их недостаткам относят необходимость частой поверки из-за возможной разгерметизации прибора и сложность ремонта, а также большие во многих случаях размеры термобаллона для газовых манометрических термометров. Манометрические термометры, используемые в промышленности, имеют классы точности 1 - 4.

Передаточная функция манометрических термометров может быть представлена в виде формулы (14.41)

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-\tau p}, \quad (14.41)$$

Значения постоянной времени T и времени запаздывания τ приведены в таблицу 14.6.

Таблица 14.6 - Динамические характеристики манометрических термометров

Условия определения характеристик	T, c	τ, c	τ / T
Нагрев от 30 до 100 °С в баке с водой	1	8	0,12
Нагрев от 40 до 60 °С в потоке воздуха (скорость 8 м/с)	2	12	0,17

14.4 Термоэлектрические термометры

Измерение температуры термоэлектрическими термометрами — термоэлектрическими преобразователями (ТЭП) основано на использовании открытого в 1821 г. Зеебеком термоэлектрического эффекта.

14.4.1 Термоэлектрический преобразователь

Он представляет собой цепь, состоящую из двух или нескольких соединенных между собой разнородных проводников.

На рисунке 14.129 представлена термоэлектрическая цепь, состоящая из двух проводников (термоэлектродов) A и B . Места соединений термоэлектродов 1 и 2 называют спаями. Зеебеком было установлено, что если температуры спаев t и t_0 не равны, то в замкнутой цепи будет протекать электрический ток. Направление этого тока, называемого термотоком, зависит от соотношения температур спаев, т. е. если $t > t_0$, то ток протекает в одном направлении, а при $t < t_0$ - в другом.

При размыкании такой цепи на ее концах может быть измерена так называемая термоэлектродвижущая сила (термоЭДС). Следует отметить, что рассматриваемый эффект обладает и обратимым свойством, заключающимся в том, что если в такую цепь извне подать электрический ток, то в зависимости от направления тока один из спаев будет нагреваться, а другой охлаждаться (эффект Пельтье). Возникновение термотока или термоЭДС в современной физике объясняется тем, что различные металлы обладают различной работой выхода электронов и поэтому при соприкосновении двух разнородных

металлов возникает контактная разность потенциалов. Кроме того, при различии температур концов проводников в них возникает диффузия электронов, приводящая к возникновению разности потенциалов на концах. Таким образом, оба указанных фактора - контактная разность потенциалов и диффузия электронов - являются слагаемыми результирующей термоЭДС цепи, значение которой зависит в итоге от природы термоэлектродов и разности температур спаев ТЭП. Для математической формализации соотношения между контактными термоЭДС и результирующей термоЭДС цепи необходимо принять ряд условий. Один термоэлектрод, от которого в спае с меньшей температурой ток идет к другому термоэлектроду, принято считать положительным, а другой - отрицательным. Например, если $t_0 < t$ и ток в этом спае направлен от термоэлектрода A к термоэлектроду B , то термоэлектрод A — термopоложительный, а B — термоотрицательный. Обозначим контактную термоЭДС в спае между термоэлектродом A и B при температуре t как $e_{AB}(t)$. Указанная запись означает, что если термоэлектрод A положительный и он в очередности написания идет первым, то термоЭДС $e_{AB}(t)$ имеет положительный знак. При принятом условии запись $e_{BA}(t)$ будет означать, что эта термоЭДС учтена с отрицательным знаком. В соответствии с законом Вольты, в замкнутой цепи из двух разнородных проводников при равенстве температур спаев термоток этой цепи равен нулю.

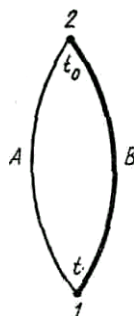


Рисунок 14.129 - Схема термоэлектрического преобразователя

Исходя из этого, можно заключить, что если спаи 1 и 2 имеют одну и ту же температуру, например t_0 , то контактные термоЭДС в каждом спае равны между собой и действуют навстречу и потому результирующая термоЭДС такого контура $E_{AB}(t_0, t_0)$ равна нулю. Это видно из равенства (14.42) /8/

$$E_{AB}(t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) - e_{AB}(t_0) = 0, \quad (14.42)$$

С учетом того, что $e_{AB}(t_0) = -e_{BA}(t_0)$, получим равенство (14.43) /8/

$$E_{AB}(t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BA}(t_0) = 0, \quad (14.43)$$

Рассматривая (14.43) с формальной точки зрения, можно принять следующее правило: результирующая термоЭДС контура равна арифметической сумме контактных термоЭДС, в символе которых очередность записи термоэлектродов соответствует направлению обхода контура (например, против движения часовой стрелки).

Для замкнутой цепи, показанной на рисунке 14.129, результирующая термоЭДС вычисляется из равенства (14.44) или (14.45) /8/

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0), \quad (14.44)$$

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{BA}(t_0), \quad (14.45)$$

Уравнение (14.45) называют основным уравнением ТЭП. Из него следует, что возникающая в контуре термоЭДС $E_{AB}(t, t_0)$ зависит от разности функций температур t и t_0 . Если сделать $t_0 = \text{const}$, то $e_{AB}(t_0) = c = \text{const}$, то получим равенство (14.46) /8/

$$E_{AB}(t, t_0)_{t_0 = \text{const}} = e_{AB}(t) - c = f(t), \quad (14.46)$$

При известной зависимости (14.46) путем измерения термоЭДС и контуре ТЭП может быть найдена температура t в объекте измерения, если температура $t_0 = \text{const}$. Спай, погружаемый в объект измерения температуры, называют рабочим спаем или рабочим концом, а спай вне объекта называют свободным спаем (концом). Следует отметить, что в явном виде зависимость (14.46) для конкретно используемых термоэлектродных материалов пока не может быть получена аналитически с достаточной точностью. Поэтому при измерении температур эта зависимость для различных используемых ТЭП устанавливается экспериментально путем градуировки и последующего табулирования или построением графика зависимости термоЭДС от температуры. В процессе градуировки температура свободных концов ТЭП должна поддерживаться постоянной и значение ее стандартизовано в РФ на уровне $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Примерный вид градуировочной кривой ТЭП показан на рисунке 14.131.

Необходимо подчеркнуть, что генерируемая в контуре ТЭП термоЭДС зависит только от химического состава термоэлектродов и температуры спаев и не зависит от геометрических размеров термоэлектродов и размера спаев.

14.4.2 Включение измерительного прибора в цепь термоэлектрического преобразователя

Для измерения термоЭДС ТЭП в его цепь включают измерительный прибор по одной из двух схем (рисунок 14.130). Обе схемы включения прибора можно представить как включение в цепь по крайней мере еще одного, третьего

проводника C . При включении измерительного прибора в разрыв спая свободного конца (рисунок 14.130 а) ТЭП имеет один рабочий спай 1 и два свободных спая 2 и 3.

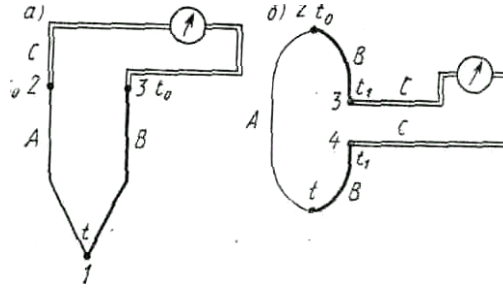


Рисунок 14.130 - Схемы включения измерительного прибора в цепь термоэлектрического преобразователя

При включении по схеме рисунка 14.130 б (в разрыв одного из термоэлектродов) ТЭП имеет четыре спая: рабочий 1, свободный 2 и два нейтральных 3 и 4 при постоянной температуре t_1 . Покажем, что, несмотря на внешнее различие схем, термоЭДС, развиваемые в обоих случаях, одинаковы, если температуры концов третьего проводника C будут равны. Для схемы рисунка 14.130 а имеем равенство (14.47) /8/

$$E_{ABC}(tt_0t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0, \quad (14.47)$$

Если температуры всех спаев одинаковы, то имеем равенство (14.48) /8/

$$E_{ABC}(t_0t_0t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0, \quad (14.48)$$

Тогда

$$e_{BA}(t_0) = e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0), \quad (14.49)$$

Подставляя (14.49) в (14.48), получим (14.50) /8/

$$E_{ABC}(tt_0t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E(tt_0), \quad (14.50)$$

т. е. уравнение (14.50) полностью совпадает с основным уравнением ТЭП (14.45).

Для цепи (рисунок 14.130 б) получим равенство (14.51) /8/

$$E_{ABC}(tt_1t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1) + e_{CB}(t_1) + e_{BA}(t_0), \quad (14.51)$$

учитывая, что $e_{BC}(t_1) = -e_{CB}(t_1)$ и $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$, запишем равенство (14.52) /8/

$$E_{ABC}(tt_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E(tt_0), \quad (14.52)$$

т. е. уравнение (14.52) также совпадает с (14.45).

Таким образом, следствием совпадения уравнений (14.50) и (14.52) с (14.45) является то, что термоЭДС ТЭП не изменяется от введения в его цепь третьего проводника при равенстве температур его концов. Этот вывод легко распространить на любое число проводников, подключаемых в контур ТЭП, при условии равенства температур концов этих проводников. Указанный вывод может быть отнесен также к подключаемому измерительному прибору.

Итак, подключение измерительного прибора в контур ТЭП по обеим схемам (рисунки 14.130 а, б) одинаково правомочно; при этом термоЭДС, генерируемая в ТЭП, не искажается.

Отметим, что при неравенстве температур спаев 2 и 3 (рисунок 14.130 а) или 3 и 4 (рисунок 14.130 б) в контуре образуется паразитная термо ЭДС.

14.4.3 Поправка на температуру свободных концов термоэлектрического преобразователя

Если температура t_0' свободных концов отлична от нуля, то показание измерительного прибора при температуре t рабочих концов будет соответствовать генерируемой в этом случае термоЭДС, вычисляемой по формуле (14.53) /8/

$$E_{AB}(tt_0') = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0'), \quad (14.53)$$

Как отмечалось, градуировочная таблица или график зависимости термоЭДС от температуры соответствует условию (14.53), когда температура t_0 свободных концов ТЭП равна нулю. Если условие сохраняется в процессе измерения то график зависимости будет соответствовать графику представленному на рисунке 14.131.

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0),$$

Вычтем из последнего выражения выражение (14.53), тогда получим равенства (14.54) или (14.55) /8/

$$E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt_0') + \left[e_{AB}(t_0') - e_{AB}(t_0) \right], \quad (14.54)$$

$$E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt_0') + E_{AB}(t_0' t_0), \quad (14.55)$$

Здесь $E_{AB}(t_0' t_0)$ представляет собой поправку, определяемую из градуированных данных используемого ТЭП по измеренному значению температуры t_0' его свободных концов. Найденное значение $E_{AB}(t_0' t_0)$ прибавляют к измеренному прибором значению $E_{AB}(tt_0')$, если $t_0' > t_0 = 0$, и отнимают от него при $t_0' < t_0 = 0$. По значению полученного результата из градуировочной таблицы или графика находят искомую температуру t (рисунок 14.131).

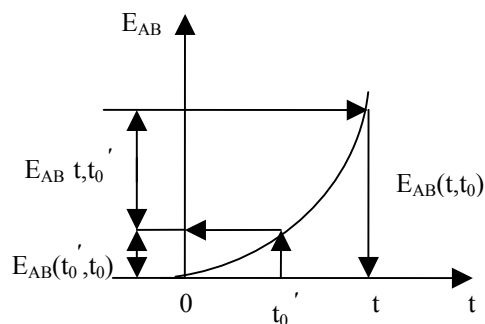


Рисунок 14.131 - Графическое введение поправки на температуру свободных концов термоэлектрического преобразователя

14.4.4 Нормальный термоэлектрод

Для оценки свойств ТЭП, составленных из различных пар разнородных термоэлектродов, достаточно знать значения термоЭДС, развиваемые термоэлектродными парами в паре с одним из термоэлектродов, называемым нормальным.

В качестве нормального стандартами предусматривается термоэлектрод из химически чистой платины. Действительно, пусть некоторые термоэлектроды из материалов A и B в паре с нормальным термоэлектродом Π создают термоЭДС соответственно $E_{A\Pi}(tt_0)$ и $E_{B\Pi}(tt_0)$. При этом рабочий спай каждой из пар имеет одну и ту же температуру t , а свободные концы - одинаковую температуру t_0 . Запишем для каждой пары основное уравнение ТЭП

$$E_{A\Pi}(tt_0) = e_{A\Pi}(t) - e_{A\Pi}(t_0),$$

$$E_{B\Pi}(tt_0) = e_{B\Pi}(t) - e_{B\Pi}(t_0).$$

Вычитая из первого уравнения второе, имеем

$$E_{АП}(t_0) - E_{ВП}(t_0) = [e_{АП}(t) + e_{ПВ}(t)] - [e_{АП}(t_0) + e_{ПВ}(t_0)]$$

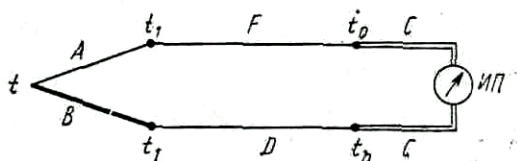
С учетом выражения (14.49) получим

$$E_{АП}(t_0) - E_{ВП}(t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0).$$

Правая часть уравнения представляет собой формулу искомой термоЭДС для ТЭП, составленного из термоэлектродов A и B , поэтому запишем формулу (14.56) /8/

$$E_{AB}(t_0) = E_{АП}(t_0) - E_{ВП}(t_0), \quad (14.56)$$

Таким образом, если известна термоЭДС двух проводников A и B в паре с третьим - нормальным термоэлектродом $П$, то можно расчетным путем, используя уравнение (14.56), определить значение термоЭДС ТЭП, выполненного из двух термоэлектродов A и B .



t - температура рабочего конца термоэлектрического преобразователя; t_1 и t_0 - температуры мест соединения проводов; C — соединительный провод.

Рисунок 14.132 - Схема соединения термоэлектрического преобразователя термокомпенсационными проводами с измерительным прибором

В справочных таблицах приводятся значения термоЭДС различных материалов в паре с платиной при $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

14.4.5 Удлиняющие термоэлектродные провода и термостатирование свободных концов ТЭП

Для исключения влияния температуры измеряемого объекта на свободные концы ТЭП их следует удалить из зоны с переменной температурой. Для этого целесообразно удлинять не сами термоэлектроды преобразователя, а, ограничиваясь разумной длиной преобразователя с точки зрения его монтажа и стоимости термоэлектродов, продлевать их с помощью специальных удлиняющих термоэлектродных проводов. Если термоэлектродные провода

правильно выбраны и подключены к ТЭП, то места их подключения к измерительному прибору рассматривают как свободные концы.

Условия, которым должны отвечать термоэлектродные провода, определим из рассмотрения схемы рисунке 14.132.

Развиваемая в цепи термоЭДС

$$E = e_{AB}(t) + e_{BD}(t_1) + e_{DC}(t_0) + e_{CF}(t_0) + e_{FA}(t_1)$$

Если принять, что все спаи в цепи имеют одинаковую температуру, равную t_l , то

$$e_{AB}(t_1) + e_{BD}(t_1) + e_{DC}(t_1) + e_{CF}(t_1) + e_{FA}(t_1) = 0$$

Вычитая это выражение из предыдущего и учитывая для соответствующих членов каждого выражения уравнение (14.56) получаем выражение (14.57) /8/

$$E = [e_{AB}(t) - e_{AB}(t_1)] + [e_{FD}(t_1) - e_{FD}(t_0)] = E_{AB}(tt_1) + E_{FD}(t_1t_0), \quad (14.56)$$

Пусть термоэлектродные провода F и D подобраны такими, что они в паре имеют термоэлектрическую характеристику, совпадающую с характеристикой используемого термоэлектрического преобразователя AB в интервале температур от $t_0 = 0^\circ\text{C}$ до $t \sim 100 - 120^\circ\text{C}$, т.е. справедливо равенство (14.57) /8/

$$E_{FD}(t_1t_0) = E_{AB}(t_1t_0), \quad (14.57)$$

Подставляя (14.57) в (14.56), получим (14.58) /8/

$$E = E_{AB}(tt_1) + E_{AB}(t_1t_0) = E_{AB}(tt_0), \quad (14.58)$$

Из выражения (14.58) следует, что включение в цепь ТЭП термоэлектродных проводов, подобранных в соответствии с (14.57), не создает в цепи паразитных термоЭДС, и потому не искажается результат измерения. В практике измерения температуры выбор термоэлектродных проводов для используемых ТЭП осуществляют по таблицам из источников металлургии. Свободные концы, удаленные от объекта измерения термоэлектродными проводами, подлежат термостатированию. Термостатирование свободных концов при $t=0^\circ\text{C}$ осуществляется в лабораторных условиях. Это достигается путем погружения свободных концов преобразователя в пробирку с маслом, находящуюся в сосуде Дьюара с тающим льдом. Для поддержания свободных концов при температуре, отличной от 0°C , используют специальные коробки,

снабженные простым автоматическим биметаллическим терморегулятором. Обычно поддерживается температура $(50 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$.

В ряде случаев при измерении термоЭДС милливольтметром применяют компенсирующий мост (рисунок 14.133) для автоматического введения поправки на температуры свободных концов преобразователя. Компенсирующий мост представляет собой электрический неравновесный мост с постоянными манганиновыми резисторами R_1 , R_2 , R_3 и медным резистором R_M . Диагональ ab питания моста подключена к стабилизированному источнику питания ИПС через нагрузочное сопротивление R_H , предназначенное для изменения напряжения питания моста при переходе к преобразователям с различной градуировкой.

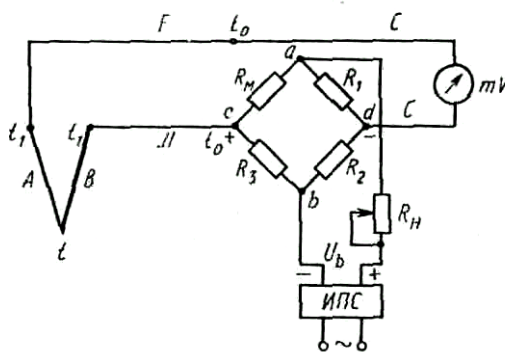


Рисунок 14.133 - Схема автоматической компенсации температуры свободных концов термоэлектрического преобразователя

Измерительная диагональ cd моста включена в разрыв между удлиняющим термоэлектродным проводом F и соединительным проводом C . При температуре свободных концов $t_0 = 0 ^\circ\text{C}$ мост находится в равновесии, т. е. напряжение в диагонали cd равно нулю. Если температура свободных концов, например, выросла и стала t_0' , то сопротивление резистора R_M , расположенного рядом с концами удлинительных проводов F и D , также вырастет, в результате чего в диагонали появится напряжение U_{cd} . Это возникшее напряжение компенсирует недостающую термоЭДС на значение поправки, т. е.

$$U_{cd} = E_{AB}(t_0' t_0).$$

Таким образом, на входе измерительного прибора $E_{AB}(t_0' t_0) + U_{cd} = E_{AB}(t_0 t_0)$. Погрешность выпускаемых в настоящее время компенсирующих мостов для ТЭП стандартных градуировок при изменении температуры t_0 в пределах $0 - 50 ^\circ\text{C}$ составляет $\pm 3 ^\circ\text{C}$.

14.4.6 Способы соединения ТЭП

Соединяя различным образом между собой термоэлектрические преобразователи, можно для конкретных задач измерения значительно улучшить точность.

Так, при необходимости измерения непосредственно разности температур используется дифференциальный способ соединения ТЭП, показанный на рисунке 14.134 а. Здесь оба конца 1 и 2 ТЭП являются рабочими и каждый из них погружается соответственно в среду с температурой t_1 и t_2 . Нейтральные концы 3 и 4 должны иметь одинаковые температуры t_0 . По развиваемой в контуре термоЭДС $E(t_1 t_2)$ определяют разность температур $t_1 - t_2$, используя соответствующий участок градуировочной кривой или таблицы ТЭП. Этот участок градуировки определяют измерением одной из температур t_2 или t_1 .

Если температура t измеряемого объекта незначительно отличается от температуры t_0 свободных концов ТЭП, то используется термобатарея (рисунок 14.134 б), представляющая собой систему из n последовательно включенных ТЭП. Спаи, имеющие температуру t , являются рабочими и располагаются в объекте измерения, а свободные концы, имеющие температуру t_0 , располагаются вне объекта. Суммарная термоЭДС в контуре термобатареи в n раз больше, чем в отдельном ТЭП, т. е. равна $nE_{AB}(t t_0)$, благодаря чему увеличивается чувствительность измерения. Термобатареи, собранные в соответствии со схемой рисунка 14.134 в. называют дифференциальными преобразователями, с помощью которых измеряют малую разность температур. Здесь спаи 1 и 2 являются рабочими и располагаются в средах соответственно с температурой t_1 и t_2 , а спаи 3 и 4 - нейтральные с одинаковой температурой t_0 . Результирующая термоЭДС. здесь равна $nE_{AB}(t_1 t_2)$.

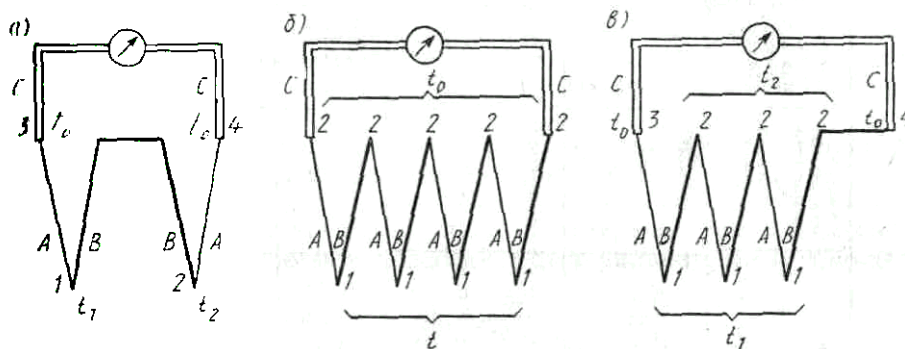


Рисунок 14.134 - Схемы соединений термоэлектрических преобразователей

14.4.7 Требования к материалам термоэлектродов и устройство ТЭП

Несмотря на то, что любые два проводника создают в паре между собой термоЭДС, лишь ограниченное число термоэлектродов используется для создания ТЭП.

К материалам термоэлектродов предъявляется ряд требований:

- однозначная и по возможности близкая к линейной зависимость термоЭДС от температуры, жаростойкость и механическая прочность с целью измерения высоких температур;
- химическая инертность;
- термоэлектрическая однородность материала проводника по длине, что позволяет восстанавливать рабочий спай без переградуировки, а также менять глубину его погружения;
- технологичность изготовления с целью получения взаимозаменяемых по термоэлектрическим свойствам материалов;
- дешевизна;
- стабильность и воспроизводимость термоэлектрических свойств, что позволяет создать стандартные градуировки. Ни один из существующих в настоящее время материалов не удовлетворяет полностью всем требованиям, в результате чего для различных пределов измерения используется термоэлектроды из различных материалов.

В настоящее время в РФ в основном применяются пять стандартных градуировок ТЭП, характеристики которых приведены в (Приложение В).

Для предохранения от механических повреждений и вредного влияния объекта измерения термоэлектроды преобразователя помещают в защитную арматуру.

На рисунке 14.135 а показано устройство стандартного термоэлектрического термометра.

В жесткой защитной гильзе 1 расположены термоэлектроды 3 с надетыми на них изоляционными бусами 4. Спай 2 касается дна защитной гильзы или может быть изолирован от него с помощью керамического наконечника. К термоэлектродам в головке 8 винтами 6 на розетке 5 подсоединяются удлинительные провода 7. Защитная гильза с содержимым вводится в объект измерения и крепится на нем с помощью штуцера 9. Для обеспечения надежного контакта спай 2 изготавливают сваркой, реже пайкой или скруткой (для высокотемпературных ТЭП). Защитную гильзу 1 выполняют в виде цилиндрической или конической трубки из газонепроницаемых материалов диаметром примерно 15—25 мм и длиной в зависимости от потребности объекта измерения от 100 до 2500 - 3500 мм. Материалом для защитной гильзы обычно служат различные стали. Для более высоких температур используются гильзы из тугоплавких термометров соединений, а также кварц и фарфор. Диаметр термоэлектродов составляет 2—3 мм, кроме термоэлектродов платиновой группы, диаметр которых 0,5 мм, что связано с их высокой стоимостью. Стандартные ТЭП выпускают одинарными, двойными и поверхностными - для измерения температуры стенок объекта, когда доступ внутрь объекта затруднителен или невозможен.

В настоящее время широкое применение находят термоэлектрические термометры кабельного типа (рисунок 14.135 б, в).

В тонкостенной оболочке 1 размещены термоэлектроды 3, изолированные друг от друга, а также от стенки оболочки термостойким керамическим порошком 4. Рабочий спай 2 может иметь контакт с оболочкой (рисунок 14.135 б) или изолируется от нее (рисунок 14.135 в). Оболочку выполняют из высоколегированной нержавеющей стали с наружным диаметром 0,5—6 мм, длиной 10—30 м. Благодаря указанным размерам кабельные термоэлектрические термометры являются весьма гибкими при достаточной механической прочности. Выпускаемые хромель-алюмелевые и хромель-копелевые кабельные термометры можно использовать в интервале температур от —50 до 300 °С при давлении 40 МПа. Внутри оболочки кабеля помещены от одного до трех ТЭП.

Выбор соответствующей конструкции ТЭП осуществляют в зависимости от конкретных условий измерения из номенклатурных перечней заводов изготовителей.

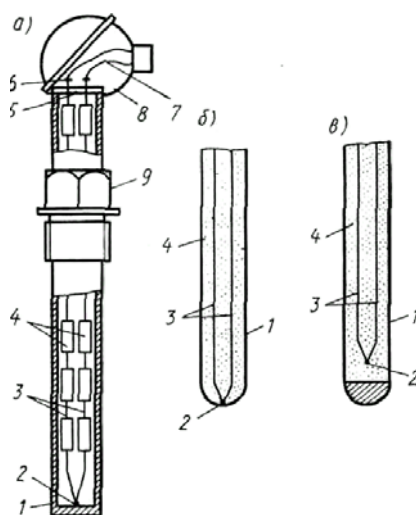


Рисунок 14.135 - Конструкция термоэлектрических термометров

Динамическая характеристика термоэлектрических термометров в общем виде описывается передаточной функцией (14.59)

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-\tau p}, \quad (14.59)$$

Значения постоянной времени T и транспортного запаздывания τ зависят от конструктивных размеров и используемых материалов защитного чехла. Для выпускаемых в настоящее время термоэлектрических термометров эти величины находятся в пределах $T=1,5 - 8$ мин и $\tau=9 - 30$ с, а $\tau/T = 0,11 - 0,78$.

14.5 Средства измерений сигналов термоэлектрических термометров

В качестве средств измерений, работающих в комплекте с ТЭП, используются милливольтметры магнитоэлектрической системы, потенциометры и нормирующие преобразователи.

14.5.1 Магнитоэлектрический милливольтметр

Схема его измерительного механизма показана на рисунке 14.136.

Механизм состоит из рамки 2, вращающейся в кольцевом зазоре между полюсными наконечниками постоянного магнита NS и цилиндрическим сердечником 1 из мягкой стали. Рамка 2 вместе со стрелкой 7 для отсчета показаний по шкале 6 прибора закреплены на кернах 5, опирающихся на подпятники 3. Установленные на кернах спиральные пружинки 4, создающие противодействующий повороту рамки момент, крепятся одним концом к оси 5, а другим — к неподвижной части прибора. Кроме того, эти пружинки являются токоподводящими элементами рамки. Рамка, закрепленная на кернах, изготавливается как с горизонтальной, так и с вертикальной осью вращения. Для обеспечения большей чувствительности милливольтметров, гальванометров и самопишущих милливольтметров их рамка крепится на вертикальных ленточных растяжках из фосфористой бронзы. Эти ленты при повороте рамки, скручиваясь, создают противодействующий момент, и одновременно по ним осуществляется подвод тока в рамку. Рамка представляет собой прямоугольник длиной l и шириной $2g$ и состоит из n витков тонкой медной проволоки, скрепленных между собой лаком. Благодаря сердечнику 1, расположенному внутри рамки, последняя оказывается под действием равномерного и радиального магнитного поля, в силу чего, независимо от угла поворота рамки, плоскость ее оказывается параллельной вектору магнитной индукции B . Таким образом, при протекании по рамке электрического тока I на подвижную систему действует магнитоэлектрический момент, который можно вычислить по формуле (14.60) /8/

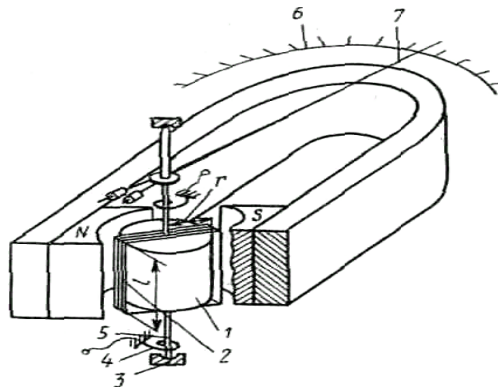


Рисунок 14.136 - Схема измерительного механизма магнитоэлектрического милливольтметра

$$M_{MЭ} = 2rlBI, \quad (14.60)$$

Противодействующий момент M_{np} , создаваемый спиральной пружиной или подвеской вычисляют по формуле (14.61) /8/

$$M_{np} = W\varphi, \quad (14.61)$$

где W – удельный противодействующий момент.

При некотором угле поворота φ имеем $M_{np}=M_{MЭ}$ т.е. учитывая (14.60) и (14.70) получаем (14.71) /8/

$$W\varphi = 2rlBI, \quad (14.71)$$

Из (14.72) получаем (14.73) /8/

$$\varphi = \frac{2rlB}{W} I = S_I I, \quad (14.72)$$

где $S_I = 2rlBI / W = \varphi / I$ - чувствительность измерительного механизма к току, рад/А.

Для получения зависимости угла поворота рамки от напряжения U , подведенного к зажимам прибора с внутренним сопротивлением R_M , из (14.72) имеем (14.73) /8/

$$\varphi = S_I \frac{U}{R_M} = S_U U, \quad (14.73)$$

Из (14.73) следует, что чувствительность прибора к напряжению тем меньше чувствительности к току, чем больше внутреннее сопротивление прибора.

Измерение термоЭДС милливольтметром осуществляется по схеме на рисунке 14.137. Генерируемая ТЭП термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ создает в замкнутой цепи ток, вычисляемый по формуле (14.74) /8/

$$I = \frac{E_{AB}(tt_0)}{R_{AB} + R_{FD} + R_C + R_Y + R_P + R_D} = \frac{E_{AB}(tt_0)}{R_{BH} + R_M}, \quad (14.74)$$

где R_{AB} , R_{FD} , R_C , R_Y , R_P , R_D — сопротивления термоэлектродов AB , удлинительных проводов FD соединительных линий C , уравнивательной катушки, рамки милливольтметра и добавочной катушки соответственно;

$R_{BH} = (R_{AB} + R_{FD} + R_C + R_Y)$ — внешнее по отношению к зажимам ab прибора сопротивление цепи;

$R_M = (R_P + R_D)$ — внутреннее сопротивление милливольтметра.

Представим (14.74) в виде (14.75) /8/

$$U_{ab} = IR_M - E_{AB}(t_0) - IR_{BH}, \quad (14.75)$$

Из (14.75) можно заключить, что измеряемое милливольтметром напряжение U_{ab} , подведенное к его зажимам ab , всегда меньше, чем ЭДС в цепи, на значение падения напряжения IR_{BH} во внешней цепи, обусловленного проходящим в контуре током.

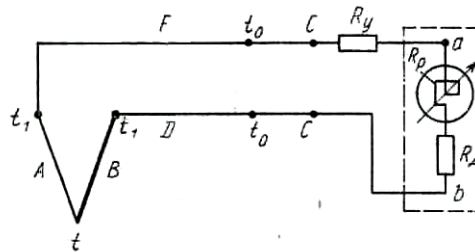


Рисунок 14.137 – Схема измерения термоЭДС милливольтметром

В силу того что сведение к нулю IR_{BH} при использовании милливольтметра невозможно, принципиально невозможно непосредственное измерение ЭДС милливольтметром. В то же время при соблюдении определенных условий измерения с некоторой погрешностью можно принять, что показания милливольтметра однозначно зависят от развиваемой в цепи термоЭДС.

Подставляя (14.74) в (14.72) получаем (14.76) /8/

$$\varphi = S_I \frac{E_{AB}(t_0)}{R_{BH} + R_M}, \quad (14.76)$$

Отсюда следует, что если бы имело место $R_{BH} + R_M = const$, то между показанием φ милливольтметра и измеряемой ЭДС была бы однозначная зависимость и шкалу милливольтметра можно было бы градуировать в градусах, соответствующих термоЭДС для данного преобразователя AB . В то же время как R_{BH} , так и R_M изменяются в зависимости от температуры окружающей среды, что приводит к погрешности измерения. Покажем, что

уменьшение указанной погрешности может быть достигнуто путем уменьшения отношения R_{BH}/R_M и уменьшения R_P/R_M .

Преобразуем (14.74) к виду (14.75) /8/

$$U_{ab} = IR_M = \frac{E_{AB}(tt_0)}{1 + R_{BH} / R_M}, \quad (14.75)$$

Из выражения (14.75) видно, что чем меньше отношение R_{BH}/R_M по сравнению с единицей, тем в меньшей мере изменение этого отношения, вызванного, например, изменением температуры окружающей среды, сказывается на линейной связи между U_{ab} и $E_{AB}(tt_0)$. Уменьшение отношения R_{BH}/R_M возможно за счет увеличения R_M . Так как рамка милливольтметра выполнена из медного провода с сопротивлением R_P , то R_M увеличивают за счет увеличения последовательно соединенного с рамкой добавочного сопротивления R_d , выполненного в виде манганиновой катушки. Значительное увеличение R_M приводит к уменьшению чувствительности S_U милливольтметра. Обычно $R_M = 100 — 500$ Ом, а отношение $R_P / R_M \leq 1/3$, что значительно уменьшает температурный коэффициент прибора. Значение R_{BH} стандартизовано в пределах 0,6—25 Ом и указано на шкале прибора.

Таким образом, использование градусной шкалы милливольтметра возможно, если градуировка ТЭП соответствует градуировке, указанной на шкале. При этом необходимо сопротивление у внешней линии подогнать к значению R_{BH} , указанному на шкале прибора, с помощью подгоночного сопротивления R_Y . Если милливольтметр имеет милливольттовую шкалу, то она наносится без учета сопротивления внешней линии и показания по шкале соответствуют напряжению на зажимах, т. е. U_{ab} , по которому при известных R_{BH} и R_M определяют из (14.75) термоЭДС для ТЭП любой градуировки, а затем значение измеряемой температуры по градуировочным таблицам.

Милливольтметры, предназначенные для работы в комплекте с ТЭП, по конструктивному исполнению бывают переносными и стационарными (щитовыми).

Стационарные милливольтметры имеют только градусную шкалу. Промышленностью выпускаются показывающие, самопишущие и регулирующие милливольтметры классов точности 0,5; 1,0; 1,5; 2,0.

Переносные милливольтметры имеют две шкалы (градусную и милливольттовую) или только одну милливольттовую. Эти приборы выполняют как показывающие и имеют классы точности: 0,2; 0,5; 1,0.

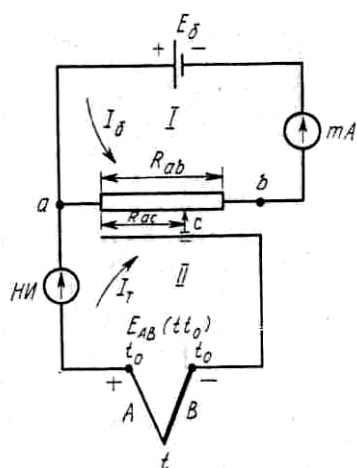


Рисунок 14.138 - Принципиальная схема потенциометра

14.5.2 Потенциометры

Принцип действия этих приборов основан на уравнивании (компенсации) неизвестной ЭДС известным падением напряжения, создаваемым током от дополнительного источника. Схема, поясняющая компенсационный метод измерения ЭДС, показана на рисунке 14.138. Замкнутый контур 1 содержит дополнительный источник тока напряжением E_δ и реохорд (компенсационный резистор) R_{ab} . Этот контур называют компенсационным. Контур измерения 2 включает в себя ТЭП, термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ которого измеряется, и высокочувствительный гальванометр, выполняющий функцию нуля-индикатора (НИ), а также часть R_{ac} реохорда от точки a до подвижного контакта движка c . Функция нуля-индикатора состоит в обнаружении тока в цепи. Измеряемый источник $E_{AB}(tt_0)$ включен навстречу дополнительному источнику E_δ так, что токи от обоих источников на участке R_{ac} идут в одном направлении. Если обозначить ток, проходящий в контуре I, через I_δ (рабочий ток), а ток для контура II при некотором положении движка C через I_T , то на основании закона Кирхгофа для контура II справедливо равенство $E_{AB}(tt_0) = I_T R_{BH} + I_T R_{НИ} + I_T R_{ac} + I_\delta R_{ac}$, где $R_{НИ}$ и R_{BH} — сопротивления нуля-индикатора и внешних проводов, включая ТЭП, откуда $I_T = [E_{AB}(tt_0) - I_\delta R_{ac}] / (R_{BH} + R_{НИ} + R_{ac})$. Перемещая движок C , можно добиться того, чтобы I_T стал равным нулю. Это определится показанием нуля-индикатора, и тогда справедливо равенство (14.76) /8/

$$E_{AB}(tt_0) = I_\delta R_{ac}, \quad (14.76)$$

Полученное равенство указывает на то, что если в контуре, где расположен источник измеряемой ЭДС, ток равен нулю, то падение напряжения на участке R_{ac} служит мерой измеряемой ЭДС. Преимуществом компенсационного метода измерения термоЭДС является отсутствие тока в цепи в момент измерения. Это исключает необходимость учета значений

сопротивления внешней цепи и изменения сопротивления этой цепи от температуры.

Компенсирующее напряжение $I_{\delta}R_{ac}$ можно изменять двумя методами:

- 1) поддерживая значение тока I_{δ} на постоянном уровне, изменять сопротивление R_{ac} ;
- 2) сохраняя сопротивление R_{ac} постоянным, изменять значение рабочего тока I_{δ} .

Наибольшее распространение получил потенциометр с постоянной силой рабочего тока, показанный на рисунке 14.139

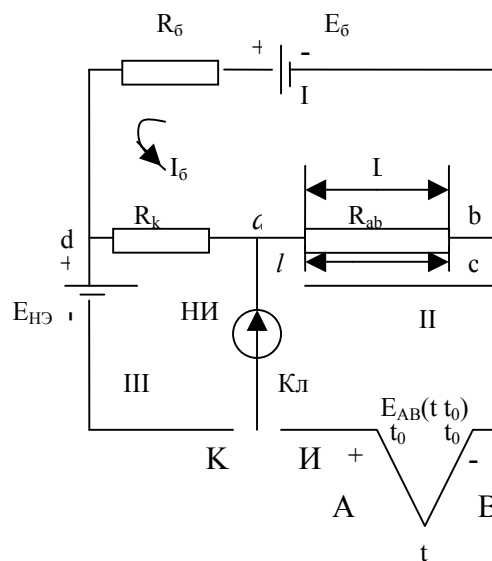


Рисунок 14.139 – Схема потенциометра с постоянной силой рабочего тока

Для контроля за постоянством тока I_{δ} предусмотрен дополнительный контур /// — контур нормального элемента. Нормальный элемент представляет собой образцовую меру ЭДС, равную $E_{НЭ}=1,0186\text{ В}$ и сохраняющую это значение рабочего тока при кратковременных и малых нагрузках в течение длительного времени.

При установке ключа $Kл$ в положение K (контроль) проводят сравнение ЭДС нормального элемента $E_{НЭ}$ с падением напряжения U_{da} на постоянном резисторе R_K . Если при этом стрелка нуль-индикатора не на нуле, т. е. в контуре /// проходит ток, а это означает, что $E_{НЭ} \neq U_{da}$, то с помощью реостата R_{δ} изменяют ток I_{δ} в контуре / до тех пор, пока стрелка нуль-индикатора не установится на нуле. Тогда $E_{НЭ} = U_{da}$. Так как $U_{da} = I_{\delta}R_K$ и $R_K = 509,3\text{ Ом}$, то $I_{\delta} = E_{НЭ} / R_K = 1,0186/509,3 = 2\text{ мА}$. После стандартизации значения тока I_{δ} ключ $Kл$ переводят в положение II (измерение) и перемещают движок C реохорда R_{ab} до установления стрелки нуль-индикатора на нуле. При этом справедливо равенство (14.77) /8/

$$E_{AB}(t, t_0) = I_{\delta}R_{ac} = E_{НЭ}R_{ac} / R_K, \quad (14.77)$$

При равномерной намотке реохорда сопротивления его участков пропорциональны соответствующим длинам, т. е. $R_{ac} / R_{ab} = l / L$, и тогда получаем равенство (14.78) /8/

$$E_{AB}(tt_0) = E_{HЭ} R_{ac} / R_K = (E_{HЭ} / R_K) (R_{ab} / L) l = kl, \quad (14.78)$$

где $k = (E_{HЭ} / R_K) (R_{ab} / L) = const.$

Таким образом, измерение термоЭДС сводится к измерению длины l участка реохорда, которая проградуирована в единицах напряжения. Потенциометры, работающие по указанной схеме, имеют высокий класс точности, вплоть до 0,0005.

Схема потенциометра с переменной силой рабочего тока I_δ показана на рисунке 14.140. Измеряемая термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ компенсируется здесь падением напряжения $I_\delta R_{ab}$ на постоянном и известном сопротивлении R_{ab} путем изменения значения тока I_δ в компенсационном контуре / с помощью реостата R_δ . Движок последнего перемещается до тех пор, пока нуль-индикатор НИ в контуре // не покажет нуль, при этом отсчитывается значение тока I_δ по шкале миллиамперметра. Ввиду того что измеряемая термоЭДС зависит от точности и стабильности показаний миллиамперметра, рассматриваемый потенциометр уступает по точности потенциометру с постоянной силой рабочего тока.

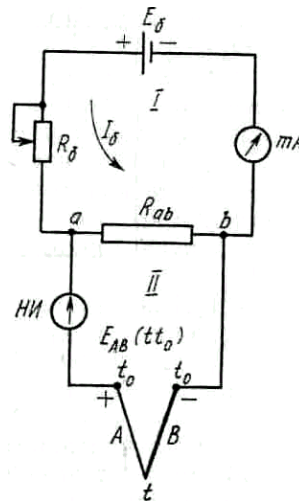


Рисунок 14.140 - Схема потенциометра с переменной силой рабочего тока

В то же время схема потенциометра с переменной силой рабочего тока находит применение, в частности, при построении нормирующих токовых преобразователей.

14.5.3 Автоматические потенциометры

Измерительная схема автоматического потенциометра (рисунок 14.141) основана на схеме потенциометра с постоянной силой рабочего тока (смотри

рисунок 14.139). Однако здесь предусматриваются два контура компенсации напряжения // и III. Контур III, содержащий в цепи резистор R_M из медной проволоки, служит для автоматического введения поправки на температуру свободных концов термоэлектрического преобразователя. Свободные концы термоэлектрического преобразователя AB с помощью удлинительных проводов FD подводятся к резистору R_M и находятся при одной с ним температуре. Остальные резисторы измерительной схемы потенциометра выполняют из манганина. Для питания контуров // и III в современных автоматических потенциометрах вместо батареи постоянного тока (сухого элемента) используется источник стабилизированного питания ИПС, в котором входное напряжение переменного тока 6,3 В выпрямляется и стабилизируется в выходное напряжение постоянного тока 5 В (погрешность стабилизации ± 5 или ± 10 мВ соответственно для классов точности 0,1 и 0,2) при нагрузке 1000 Ом и токе нагрузки I_0 , равном 5 мА. При работе ИПС в составе потенциометра напряжение между точками d и k $U_{dk} = 1019$ мВ. Благодаря использованию ИПС в автоматических потенциометрах установка рабочего тока осуществляется через несколько тысяч часов непрерывной работы, кроме того, упростилась кинематика механизма и повысилась надежность прибора.

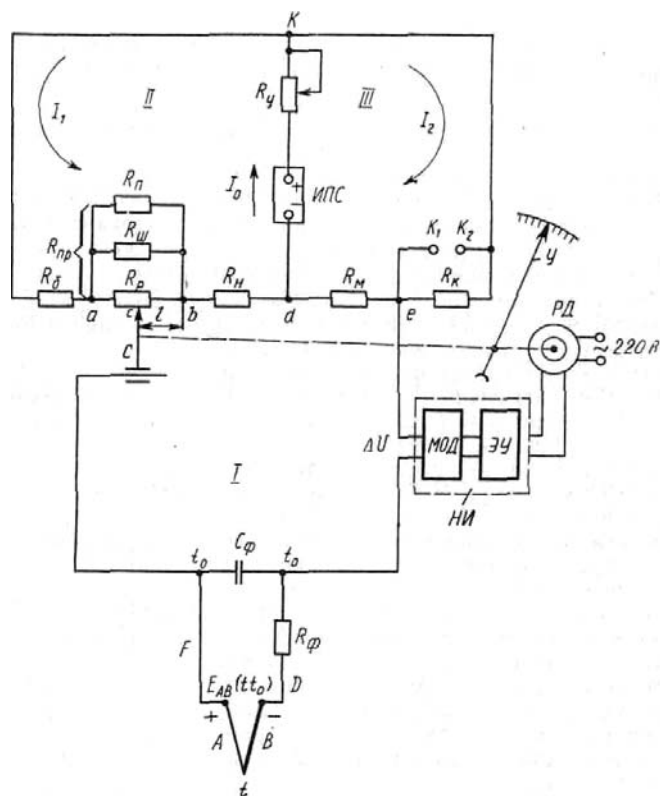


Рисунок 14.141 - Измерительная схема автоматического потенциометра

Подключение к клеммам K_1 и K_2 нормального элемента $E_{НЭ}$ и последовательно соединенного с ним нуль-индикатора осуществляется для контроля рабочего тока I_2 лишь при проверке и градуировке потенциометра. При этом $U_{ке} = I_2 R_K = E_{НЭ}$. Обычно $R_K = 509,3$ Ом, тогда $I_2 = 2$ мА; R_Y — резистор для установки рабочего тока I_2 ; $R_{ПР}$ — значение сопротивления реохордной группы,

состоящей из трех параллельно соединяемых резисторов: собственно реохорда R_P , шунта R_{III} и сопротивления R_{II} . Такое исполнение реохордной группы связано с тем, что реохорд R_P является ответственным узлом, предназначенным для измерения. Поэтому он изготавливается из проволоки специального сплава. При необходимости изменения сопротивления на участке ab , что бывает связано с изменением диапазона измерения, изменяют общее сопротивление R_{II} этого участка за счет изменения R_{II} , а иногда и R_{III} , оставляя при этом R_P стандартным. Резисторы R_H и R_6 служат для установления начального значения шкалы прибора и значения тока $I_I = 3$ мА. В качестве нуля-индикатора $НИ$ в автоматических потенциометрах используется электронный усилитель ЭУ, на входе которого установлен модулятор МОД для преобразования сигнала небаланса напряжения постоянного тока ΔU в переменное напряжение. Для предохранения усилителя от наводок и помех, возникающих в цепи термоэлектропреобразователя под влиянием электромагнитных полей, предусмотрен фильтр, состоящий из сопротивления R_Φ и конденсатора C_Φ . Рассмотрим работу автоматического потенциометра. Пусть при некотором значении измеряемой термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ и некотором положении движка реохорда C ток в контуре измерения // равен нулю, т. е. $E_{AB}(tt_0)$ скомпенсировано падением напряжения U_{ce} на участке $cbde$. Тогда сигнал небаланса $\Delta U = E_{AB}(tt_0) - U_{ce}$ равен нулю. При сигнале $\Delta U \neq 0$ на выходе усилителя в соответствии с абсолютным значением и знаком небаланса формируется управляющий сигнал, при котором реверсивный двигатель РД перемещает движок реохорда C до тех пор, пока ΔU не станет равным нулю. Одновременно с движком по шкале прибора перемещается указатель $У$. Сведение к нулю небаланса ΔU , т. е. достижение полного равенства компенсирующего напряжения U_{ce} измеряемой термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$, реализуется благодаря тому, что система автокомпенсации является астатической. Свойство астатичности достигается из-за наличия в системе регулирования небаланса интегрирующего или астатического звена, в качестве которого выступает здесь реверсивный двигатель.

Разберем теперь, как осуществляется автоматическое введение поправки на температуру свободных концов термоэлектропреобразователя.

При некоторой температуре t рабочего спая и температуре свободных концов $t_0 = 0$ имеет место равенство (14.79)

$$E_{AB}(tt_0) = U_{ce} = U_{cb} + U_{bd} - U_{ED}, \quad (14.79)$$

Пусть при той же температуре рабочего спая t температура свободных концов изменилась: $t_0' > t_0$. Тогда термоЭДС ТЭП уменьшится на $E_{AB}(t_0' t_0)$ и станет равной $E_{AB}(tt_0') = E_{AB}(tt_0) - E_{AB}(t_0' t_0)$. Повышение температуры от t_0 до t_0' приведет к увеличению значения сопротивления резисторы от $(R_M)_{t_0}$ до

$(R_M)_{t_0'}$, т.е. на $\Delta R_M = (R_M)_{t_0'} - (R_M)_{t_0}$. Вследствие этого падение напряжения на этом резисторе увеличится на $\Delta U_{ed} = I_2 \Delta R_M$, тогда получаем равенство (14.80)

$$E_{AB}(t_0') = E_{AB}(t_0) - E_{AB}(t_0' t_0) = U_{cb} + U_{bd} - (U_{ed} + \Delta U_{ed}) = U_{ce} - \Delta U_{ed}, \quad (14.80)$$

Таким образом, при неизменной температуре рабочего спая t и любой температуре свободных концов t_0' для того, чтобы движок С не перемещался и не изменялось показание прибора, т. е. Для того, чтобы небаланс ΔU равнялся нулю, необходимо обеспечить условие (14.81) /8/

$$E_{AB}(t_0' t_0) = \Delta U_{ed} = I_2 \Delta R_M, \quad (14.81)$$

Значение сопротивления медного резистора $(R_M)_{t_0}$ при $t=0$ °С определяют из (14.81), учитывая, что входящее сюда значение ΔR_M равно $\Delta R_M = (R_M)_{t_0} \alpha (t_0' - t_0)$. Следовательно получим формулу (14.82) /8/

$$(R_M)_{t_0} = \frac{E_{AB}(t_0' t_0)}{\alpha I_2 (t_0' - t_0)}, \quad (14.82)$$

где α — температурный коэффициент электрического сопротивления меди;

$$I = 2 \text{ мА};$$

t_0' — принимают равным 50 °С.

Выпускаемые промышленностью автоматические потенциометры, различаясь конструктивным исполнением, имеют практически одну и ту же типовую измерительную схему, подобную приведенной на рисунке 14.141.

При решении задач автоматического контроля и регулирования на практике оказывается необходимым с точки зрения увеличения точности измерения температуры конкретного объекта изменить стандартные пределы измерения на заданный диапазон. Значения сопротивления резисторов измерительной схемы для заданного диапазона можно получить из следующих соотношений.

Для заданных начального t_{min} и конечного t_{max} значений температуры по шкале прибора для конкретного ТЭП из таблиц определяют $E_{AB}(t_{max} t_0)$ и $E_{AB}(t_{min} t_0)$. Падение напряжения U_{ab} на сопротивлениях реохордной группы

равно диапазону измерения прибора, т. е. Падение напряжения можно вычислить по формуле (14.83) /8/

$$U_{ab} = I_1 R_{ПП} = E_{AB}(t_{MAX} t_0) - E_{AB}(t_{MIN} t_0), \quad (14.83)$$

Отсюда определяют значение $R_{ПП}$, принимая $I_1 = 3 \text{ мА}$. Так как

$$R_{ПП} = \frac{R_{\mathcal{E}} R_{II}}{R_{\mathcal{E}} + R_{II}}, \quad R_{\mathcal{E}} = \frac{R_P R_{III}}{R_P + R_{III}}, \quad R_P = 130 \text{ Ом} \text{ и } R_{\mathcal{E}} = 90 \text{ или } 100 \text{ Ом},$$

По найденному значению $R_{ПП}$ определяют R_{II} . Значение R_Y подбирают из условия (14.84) /8/

$$E_{AB}(t_{MIN} t_0) = U_{be} = I_1 R_H - I_2 (R_M)_{t_0}, \quad (14.84)$$

Из (14.84) следует (14.85) /8/

$$R_H = [E_{AB}(t_{MIN} t_0) + I_2 (R_M)_{t_0}] / I_1, \quad (14.85)$$

Значение резистора R_{δ} определяется из условия постоянства тока $I_1 = 3 \text{ мА}$, и определяется по формуле (14.86) /8/

$$I_1 (R_{\delta} + R_{np} + R_H) = U_{dk} = I_2 [R_K + (R_M)_{t_0}] \quad , \quad (14.86)$$

откуда получаем (14.87) или (14.88)

$$R_{\delta} = \{I_2 R_K - I_1 R_{ПП} - [I_1 R_H - I_2 (R_M)_{t_0}]\} / I_1, \quad (14.87)$$

$$R_{\delta} = [I_2 R_K - I_1 R_{ПП} - E_{AB}(t_{MIN} t_0)] / I_1, \quad (14.88)$$

Автоматические потенциометры конструктивно, а также по дополнительно выполняемым функциям имеют ряд модификаций. Различают полногабаритные, малогабаритные и миниатюрные автоматические потенциометры с шириной диаграммной ленты 250, 160 и 100 мм. Автоматические потенциометры выпускают в виде показывающих и самопишущих, одно- и многоточечных. В них могут встраиваться регулирующие и сигнализирующие устройства, а также устройства для передачи показаний на расстояние с помощью токовых, частотных, пневматических и ферродинамических преобразователей.

В зависимости от модификации классы точности прибора равны 0,25; 0,5 и 1,0. Несмотря на различия в конструктивном исполнении приборов и в их

габаритных размерах измерительная схема автоматических потенциометров практически не отличается от схемы на вышеприведенном рисунке.

14.5.4 Нормирующие преобразователи термоЭДС

Для введения информации от ТЭП в ЭВМ или в систему автоматического регулирования широко применяются нормирующие измерительные токовые преобразователи. Они предназначены для преобразования сигнала ТЭП в унифицированный сигнал постоянного тока 0 - 5 мА.

В основу работы нормирующего преобразователя положен компенсационный метод измерения термоЭДС с использованием схемы потенциометра с переменной силой рабочего тока. Схема преобразователя приведена на рисунке 14.142. Здесь / — контур измерения; // — контур компенсации. Контур / содержит корректирующий мост $K.M$, усилитель $У_1$ с токовым выходом $I_{БЛХ}$ и резистор R_{KH} . К контуру / с помощью удлинительных проводов F и D подсоединен ТЭП AB . Корректирующий мост предназначен для введения автоматической поправки на изменение температуры свободного конца ТЭП, а также компенсации начальной термоЭДС в преобразователях, нижний предел измерения которых не равен 0 °С. К диагонали ab питания моста подведено стабилизированное напряжение постоянного тока. Резисторы R_1 , R_2 и R_3 —манганиновые, резистор R_M — из медного провода. Усилитель $У_1$ состоит из двух каскадов: магнитного $УМ$, выполненного по двухтактной двухполупериодной схеме, и полупроводникового усилителя $УП$, работающего в режиме усиления постоянного тока. Усилитель $У_1$ выполняет функции нуля-индикатора.

Контур компенсации II включает в себя резистор R_{KH} и усилитель обратной связи $У_2$. Этот усилитель аналогичен усилителю $У_1$, но включен с глубокой отрицательной связью по выходному току усилителя. Выходной ток I_{OC} усилителя $У_2$ является рабочим током контура // и при прохождении этого тока по сопротивлению R_{KH} на нем со стороны контура // создается компенсирующее напряжение $U_{KH} = I_{OC} R_{KH}$. Со стороны контура / к резистору

R_{ab} подводится сигнал термоэлектродпреобразователя $E_{AB}(t_0')$, сложенный с напряжением U_{cd} , создаваемым в измерительной диагонали cd корректирующего моста KM . Это напряжение, как указывалось, равно поправке на температуру свободных концов ТЭП, т. е. $U_{cd} = E_{AB}(t_0' t_0)$. Таким образом,

этот суммарный сигнал, равный

$E_{AB}(t_0) = E_{AB}(t_0) = E_{AB}(t_0') + U_{cd}$, сравнивается с напряжением U_{KH} . Небаланс,

равный $\Delta U = E_{AB}(t_0) - U_{KH}$, подается на усилитель $У_1$, где этот сигнал постоянного тока ΔU преобразуется сперва в магнитном усилителе $УМ$ в сигнал переменного тока, затем усиливается и опять преобразуется в сигнал

постоянного тока, который дополнительно усиливается в полупроводниковом усилителе УП постоянного тока. Выходной сигнал усилителя U_1 создает ток $I_{ВЫХ}$, который поступает во внешнюю цепь $R_{ВН}$ и далее через делитель — в усилитель обратной связи U_2 . Выходной ток $I_{ОС}$ усилителя U_2 изменяется и изменяет падение напряжения $U_{КН}$ на резисторе $R_{КН}$ до тех пор, пока небаланс ΔU не достигнет некоторой малой величины δU , называемой статической ошибкой компенсации.

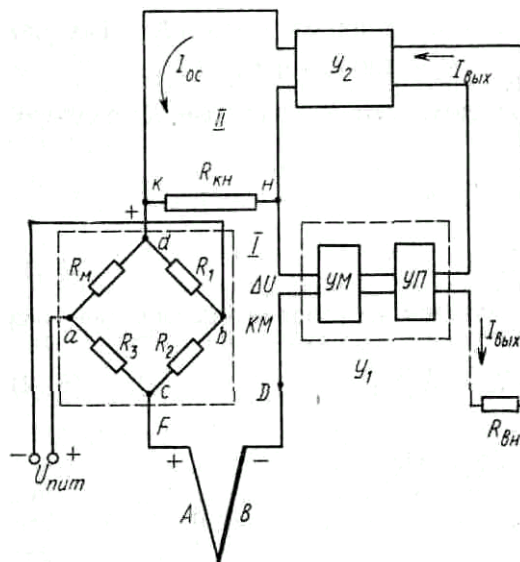


Рисунок 14.142 - Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термоэлектрическим преобразователем

Наличие статической ошибки компенсации приводит к тому, что в контуре измерения / проходит недокомпенсированный ток. При этом чем больше измеряемая термоЭДС, тем больше этот ток.

Исключить эту ошибку в устройствах, выполненных по статической автокомпенсационной схеме, принципиально невозможно, так как выходной ток преобразователя $I_{ВЫХ}$ и ток контура компенсации $I_{ОС}$ определяются наличием этой ошибки и пропорциональны ей. В то же время статическая ошибка автокомпенсационной схемы может быть значительно уменьшена, если использовать усилитель с большим коэффициентом усиления.

Рассмотрим теперь математическую связь между измеряемой термоЭДС $E_{AB}(t t_0)$ и выходным током преобразователя $I_{ВЫХ}$. В соответствии со сказанным выше, связь показывается равенством (14.89) /8/

$$\Delta U = E_{AB}(t t_0) - U_{КН}, \quad (14.89)$$

На выходах усилителей U_1 и U_2 формируются сигналы, для которых справедливы равенства (14.90), (14.91) /8/

$$I_{БЫХ} = k_1 I_{ВХ} = k_1 \frac{\Delta U}{R_{ВХ}}, \quad (14.90)$$

$$I_{ОС} = k_2 I_{БЫХ}, \quad (14.91)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты усиления усилителей U_1 и U_2 ;
 $I_{ВХ} = \Delta U / R_{ВХ}$ — ток, создаваемый во входной цепи усилителя
 сигналом ;

$R_{ВХ}$ — сопротивление входной цепи усилителя U_1 .

Падение напряжения (14.92) на резисторе $R_{КН}$ с учетом (14.91) составит

/8/

$$U_{КН} = I_{ОС} R_{КН} = k_2 I_{БЫХ} R_{КН}, \quad (14.92)$$

Подставляя в выражение (14.89) ΔU из (14.90) и $U_{КН}$ из (14.92),
 находим $I_{БЫХ}$ по формуле (14.93) /8/

$$I_{БЫХ} = k E_{АВ}(t, t_0), \quad (14.93)$$

где $k = \frac{1}{R_{ВХ} / k_1 + k_2 R_{КН}}$ - коэффициент преобразования нормирующего
 преобразователя (при $k_1 \rightarrow \infty, k = 1 / (k_2 R_{КН})$).

Таким образом, выходной токовый сигнал нормирующего
 преобразователя пропорционален откорректированному по температуре
 свободного спая сигналу ТЭП.

В зависимости от диапазона входного сигнала нормирующие
 преобразователи, работающие в комплекте с ТЭП, имеют классы точности
 0,6—1,5.

14.6 Термопреобразователи сопротивления

Измерение температуры термопреобразователями сопротивления
 основано на свойстве металлов и полупроводников изменять свое
 электрическое сопротивление с изменением температуры. Если априорно
 известна зависимость между электрическим сопротивлением R_t
 термопреобразователя сопротивления и его температурой t (т. е. $R_t = f(t)$ —
 градуировочная характеристика), то, измерив R_t , можно определить значение
 температуры среды, в которую он погружен. Термопреобразователи позволяют
 надежно измерять температуру в пределах от - 260 до + 1100°С. К
 металлическим проводникам термопреобразователей сопротивления
 предъявляется ряд требований, основными из которых являются стабильность
 градуировочной характеристики, а также ее воспроизводимость,

обеспечивающая взаимозаменяемость изготавливаемых термопреобразователей сопротивления. К числу не основных, но желательных требований относятся: линейность функции $R_t = f(t)$, по возможности высокое значение температурного коэффициента электрического сопротивления $\alpha = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dt}$,

большое удельное сопротивление и невысокая стоимость материала. Исследованиями установлено, что чем чище металл, тем в большей степени он отвечает указанным основным требованиям и тем больше значения отношения R_{100}/R_0 и α (где R_0 и R_{100} — электрические сопротивления металла при 0 и 100 °С соответственно). Поэтому степень чистоты металла, а также наличие в нем механических напряжений, принято характеризовать значениями R_{100}/R_0 и α . При снятии механических напряжений в металле путем его отжига указанные характеристики достигают своих предельных значений для данного металла. Изменение сопротивления материала с изменением температуры от 0 до 100 °С характеризуется коэффициентом $\alpha_{0,100} = (R_{100} - R_0) / R_0 \cdot 100$. Металлы имеют положительный температурный коэффициент сопротивления. Для большинства чистых металлов он равен $4 \cdot 10^{-3} — 6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что составляет увеличение электрического сопротивления при повышении температуры на один градус примерно на 0,4—0,6 % от сопротивления при 0 °С. Для изготовления стандартизованных термопреобразователей сопротивления в настоящее время применяют платину и медь. Платина является наилучшим материалом для термопреобразователей сопротивления, так как легко получается в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью, химически инертна и окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно большой температурный коэффициент сопротивления, равный $3,94 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, и высокое удельное сопротивление $0,1 - 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Платиновые преобразователи сопротивления используются для измерения температуры от - 260 до + 1100 °С, при этом для диапазона температур от - 260 до +750 °С используются платиновые проволоки диаметром 0,05 - 0,1 мм, а для измерения температур до 1100 °С, в силу распыления платины при этих температурах, диаметр проволоки составляет около 0,5 мм. Значение отношения R_{100}/R_0 для применяемых платиновых проволок составляет 1,3850—1,3910. Платиновые термопреобразователи сопротивления являются наиболее точными первичными преобразователями в диапазоне температур, где они могут быть использованы. Платиновые термопреобразователи сопротивления используются в качестве рабочих, образцовых и эталонных термометров. С помощью последних осуществляется воспроизведение международной шкалы температур в диапазоне от - 182,97 до 630,5 °С. Недостатком платины является нелинейность функции $R_t=f(t)$ и кроме того, платина — очень дорогой металл. Медь — один из недорогостоящих металлов, легко получаемых и чистом виде. Медные термопреобразователи сопротивлений предназначены для измерения температуры в диапазоне от —50 до +200 °С. При более высоких температурах медь активно окисляется и потому не используется. Диаметр медной проволоки обычно 0,1 мм, а значение отношения R_{100}/R_0 составляет 1,4260 - 1,4280. В

широком диапазоне температур зависимость сопротивления от температуры линейна и имеет вид $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Никель и железо благодаря своим относительно высоким температурным коэффициентам электрического сопротивления и сравнительно большим сопротивлениям хотя и используются для измерения температуры в диапазоне от - 50 до + 250 °С, однако широко не применяются. Это связано с тем, что градуировочная характеристика их нелинейна, а главное, не стабильна и не воспроизводима, и потому термопреобразователи сопротивления, изготовленные из этих металлов, не стандартизованы. Конструкция технических термометров с металлическим термопреобразователем сопротивления показана на рисунке 14.143.

Тонкая проволока или лента / из платины или меди наматывается бифилярно на каркас 2 из керамики, слюды, кварца, стекла или пластмассы. Бифилярная намотка необходима для исключения индуктивного сопротивления. После намотки обычно неизолированной платиновой проволоки каркас вместе с проволокой покрывают слюдой. Длина намотанной части каркаса с платиновой проволокой 50—100 мм, а с медной—40 мм. Каркас для защиты от повреждений помещают в тонкостенную алюминиевую гильзу 3, а для улучшения теплопередачи от измеряемой среды к намотанной части каркаса между последней и защитной гильзой 3 устанавливаются упругие металлические пластинки 4 или массивный металлический вкладыш. Помимо наматываемого проволокой каркаса используются двух- и четырехканальные керамические каркасы. В каналах размещают проволочные платиновые спирали, которые фиксируются в каналах каркаса с помощью термоцемента на основе оксида алюминия и кремния.

При изготовлении медных термопреобразователей сопротивления применяют безындукционную бескаркасную намотку. В качестве материала используют изолированную медную проволоку диаметром 0,08 мм, покрытую фторопластовой пленкой. Гильзу 3 с её содержимым помещают во внешний, обычно стальной, замкнутый чехол 5, который устанавливается на объекте измерения с помощью штуцера 6. На внешней стороне чехла располагается соединительная головка 8, в которой находится изоляционная колодка 7 с винтами для крепления выводных проводов, идущих от каркаса через изоляционные бусы 9. Термопреобразователи сопротивления по внешнему виду и размерам аналогичны термоэлектрическим преобразователям.

Динамическая характеристика термопреобразователей может быть представлена передаточной функцией вида $W(P) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-\tau P}$, где K — коэффициент преобразования; T и τ — постоянная времени и время запаздывания соответственно. Значения T и τ зависят от размеров защитного чехла и его материала, теплоемкости элементов, находящихся в чехле, а также от условий теплообмена. Так, при скачкообразном нагреве от 30 до 100 °С в баке с водой для термопреобразователя со стальным чехлом $\tau = 8$ с и $T = 120$ с, а для латунного чехла $\tau = 3$ с и $T = 33$ с.

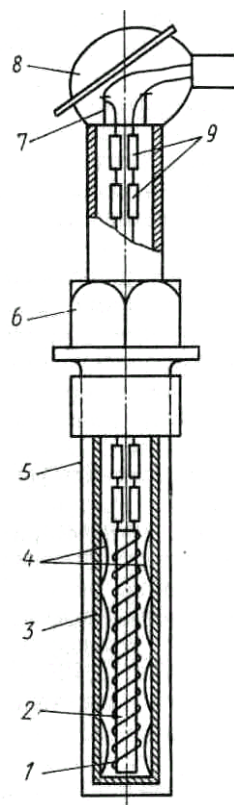


Рисунок 14.143 - Конструкция термометра с металлическим термопреобразователем сопротивления

Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления применяются для измерения температуры от -100 до 300 $^{\circ}\text{C}$. В качестве материалов для них используются различные полупроводниковые вещества — оксиды магния, кобальта, марганца, титана, меди, кристаллы германия.

Основным преимуществом полупроводников является их большой отрицательный температурный коэффициент сопротивления. При повышении температуры полупроводников на один градус их сопротивление уменьшается на 3—5 %, что делает их очень чувствительным к изменению температуры. Кроме того, они обладают значительным удельным сопротивлением и потому даже при очень малых размерах обладают значительным номинальным электрическим сопротивлением (от нескольких до сотен килоОм), что позволяет не учитывать сопротивления соединительных проводов и элементов измерительной схемы. Следствием же малых размеров полупроводниковых термопреобразователей сопротивления является возможность безынерционного измерения температуры.

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры в интервалах, не превышающих 100 $^{\circ}\text{C}$, определяется выражением $R_T = AT^b \exp(B/T)$. В узких интервалах температур (не более 25 $^{\circ}\text{C}$) используется более простое выражение $R_T = A \exp(B/T)$ (где R_T —сопротивление при температуре T , K ; A , B —постоянные коэффициенты, зависящие от свойств материала полупроводника).

Недостатком полупроводниковых материалов является их значительная нелинейность и, главное, невоспроизводимость градуировочной характеристики. Поэтому полупроводниковые термопреобразователи сопротивления даже одного и того же типа имеют индивидуальные градуировки и не взаимозаменяемы.

Исключением являются германиевые термопреобразователи сопротивления, которые при технических измерениях используются для температур 30—90 К с погрешностью $\pm (0,05—0,1)$ К, а также специальный германиевый термопреобразователь, предназначенный в качестве эталонного термометра для воспроизведения температурной шкалы в интервале 4,2 - 13,81 К с погрешностью не более $\pm 0,001$ К.

Чувствительные элементы из полупроводников выполняются в виде цилиндров, шайб, бусинок малых размеров.

В силу указанных недостатков полупроводниковые термопреобразователи сопротивления редко используются для измерения температуры. Они находят широкое применение в системах температурной сигнализации, вследствие присущего им релейного эффекта — скачкообразного изменения сопротивления при достижении определенной температуры. Кроме того, полупроводниковые термопреобразователи сопротивления используются в качестве чувствительных элементов в различных газоаналитических автоматических приборах.

14.6.1 Средства измерений, работающие в комплекте термопреобразователями сопротивления

В практике технологических измерений температуры с использованием термопреобразователей сопротивления широкое применение нашли мосты (уравновешенные и неуравновешенные), логометры и нормирующие преобразователи.

Для точных измерений температуры и метрологической аттестации термопреобразователей сопротивления, проводимых обычно в лабораторных условиях, получили применение потенциометры постоянного тока.

14.6.1.1 Уравновешенные мосты

Мосты подразделяют на неавтоматические и автоматические. В них используется нулевой метод измерения. С помощью неавтоматических мостов, используемых в лабораторных условиях, измеряют сопротивление от 0,5 до 10^7 Ом, в частности производят градуировку термопреобразователей сопротивления и измеряют температуру.

Схема уравновешенного моста показана на рисунке 15.6.2. Диагональ питания моста ab содержит источник тока, а диагональ измерения dc — нуль-индикатор, в частности нуль-гальванометр. Между точками подключения разноименных диагоналей располагаются плечи моста, состоящие в данном случае из постоянных резисторов R_1 и R_2 и регулируемого R_3 , а плечо cb

содержит измеряемое сопротивление R_t и два соединительных провода каждый сопротивлением R_{BH} . Если мост уравновешен, то ток I_{HH} в диагонали cd равен нулю, а токи в соответствующих плечах равны, т. е. $I_2=I_3$ и $I_1=I_t$, и как следствие, имеем $-I_2R_2=I_tR_1$ и $I_3R_3=I_t(R_t+2R_{BH})$.

Разделив два последних равенства друг на друга, с учетом равенства соответствующих токов получаем выражение (14.94) /8/

$$R_2(R_t + 2R_{BH}) = R_1R_3, \quad (14.94)$$

Полученное выражение, выведенное из условия $I_{HH} = 0$, предопределяет условие равновесия моста: чтобы мост находился в равновесии, необходимо соблюсти равенство произведений сопротивлений противоположных его плеч. Это достигается путем регулирования сопротивления резистора R_3 до тех пор, пока нуль-индикатор не покажет нуль.

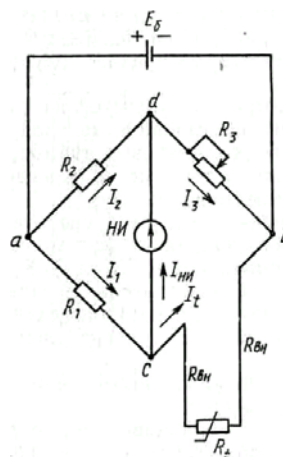


Рисунок 14.144- Схема уравновешенного моста

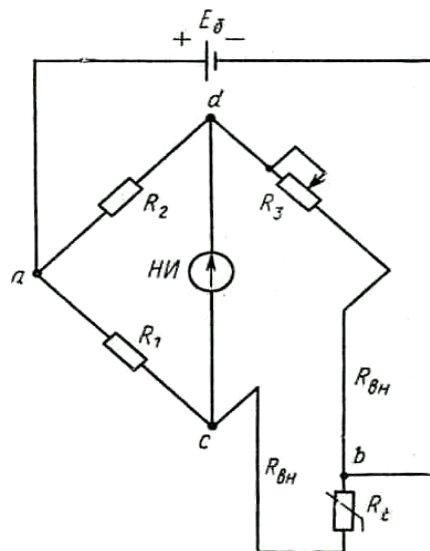


Рисунок 14.145 - Трехпроводная схема соединения термопреобразователя сопротивления с мостом

Таким образом, при равновесии моста имеет место равенство (14.95) /8/

$$R_t = \frac{R}{R_2} R_3 - 2R_{BH}, \quad (14.95)$$

Из (14.94) следует, что неизвестное сопротивление R_t может быть определено по значению R_3 при постоянном отношении плеч R_1/R_2 , а также при неизменном значении R_{BH} . В то же время R_{BH} изменяется с изменением температуры окружающей среды, что приводит к искажению результата измерения R_t и в тем большей степени, чем меньше значение R_t . Указанный недостаток может быть устранен путем трехпроводного соединения термопреобразователя сопротивления с мостом (рисунок 15.6.3). При таком соединении питающая диагональ моста доводится (точка b) до термопреобразователя сопротивления. В результате этого соединительные провода оказываются разнесенными к двум плечам моста: одно из сопротивлений R_{BH} — в плече вместе с сопротивлением R_3 , а другое R_{BH} — в смежном плече вместе с R_t . Тогда условие равновесия моста определяет равенство (14.96) /8/

$$R_1(R_3 + R_{BH}) = R_2(R_t + R_{BH}), \quad (14.96)$$

Откуда следует выражение (14.97) /8/

$$R_t = (R_1 / R_2)(R_3 + R_{BH}) - R_{BH}, \quad (14.97)$$

Если сделать мост симметричным ($R_1 = R_2$), то будем иметь $R_t = R_3$. т. е. результат измерения R_t в этом случае не зависит от сопротивления соединительных проводов R_{BH} .

Недостатком уравновешенных мостов, собранных по указанным схемам (рисунки 14.144 и 14.145), является неопределенность в измерении, которую вносит переходное сопротивление контакта в регулируемом плече R_3 . Для устранения этого недостатка подвижный контакт располагают в измерительной диагонали, при этом регулируемое сопротивление оказывается размещенным в двух плечах. Таким образом, при уравнивании моста путем перемещения контакта изменяется сопротивление сразу обоих плеч, а переходное сопротивление контакта, располагаемое теперь в измерительной диагонали, из-за отсутствия тока в момент уравнивания не сказывается на результате измерения.

Достоинством уравновешенных мостов является независимость их от напряжения питания, минимально допустимое значение которого определяется чувствительностью нуль-индикатора.

Автоматический уравновешенный мост, собранный по схеме с переменным сопротивлением плеч и трехпроводным соединением термопреобразователя сопротивления с мостом, показан на рисунок 14.146.

Переменное сопротивление здесь содержит три параллельно соединенных резистора: R_P —собственно реохорд, выполняющий измерительные функции; R_{III} —шунт реохорда; R_{II} —резистор для подгонки заданного значения параллельного соединения сопротивлений всей реохордной группы; R_{IIP} , R_1 , R_2 , R_3 — резисторы мостовой схемы; R_D —добавочный резистор для подгонки тока из условия минимального самонагрева термопреобразователя сопротивления; R_6 — резистор балластный в цепи питания для ограничения тока; R_t — термопреобразователь сопротивления; R_L — резистор для подготовки сопротивления соединительной линии; m — положение движка реохорда правее точки d в долях от R_{IIP} ; n — положение движка реохорда левее точки d в долях от R_{IIP} .

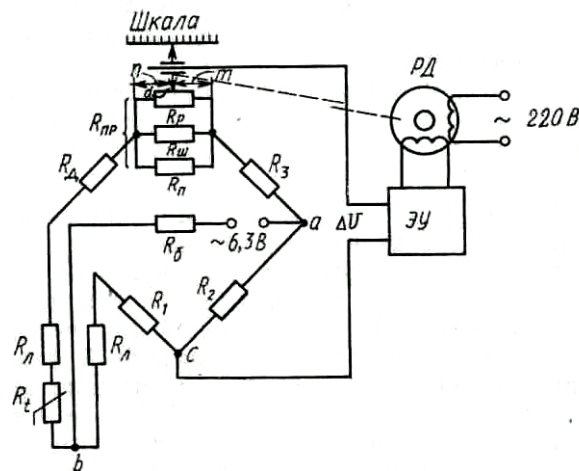


Рисунок 14.146 - Схема автоматического уравновешенного моста

Для получения линейной зависимости положения движка реохорда от изменения сопротивления резистора R_t последний включается в плечо, прилежащее к реохорду.

В качестве нуля-индикатора $НИ$ в автоматических мостах используется электронный усилитель $ЭУ$. Автоматические мосты питаются как переменным, так и постоянным током. В последнем случае на входе $ЭУ$ устанавливается модулятор, подобно тому, как это делается в автоматических потенциометрах. При изменении температуры изменяется сопротивление R_t и мост выходит из равновесия, т. е. в измерительной диагонали cd появляется напряжение дебаланса ΔU , которое усиливается усилителем $ЭУ$ до значений, достаточных для вращения ротора реверсивного двигателя $КД$ в соответствующую сторону, в зависимости от знака дебаланса. Вал $РД$, связанный с движком реохорда, перемещает его до тех пор, пока дебаланс ΔU не станет равным нулю. Одновременно с движком перемещается каретка с пером и стрелкой, указывающей по шкале положение m движка или, что то же, значение измеряемой температуры. При изменении температуры от минимального до максимального значения движок перемещается из одного крайнего положения в другое (для схемы, показанной на рисунке 15.6.4, соответственно справа налево). Пусть при температуре, соответствующей начальному значению шкалы прибора, измеряемое сопротивление R_t равно $R_{нач}$, а при изменении

температуры $R_t = R_{нач} + \Delta R_t$. Условия равновесия для двух этих случаев представляются в виде равенства (14.98) и (14.99) /8/

$$(R_{нач} + R_{л} + R_{д} + R_{пп})R_2 = (R_1 + R_{л})R_3, \quad (14.98)$$

$$(R_{нна} + \Delta R_t + R_{л} + R_{д} + R_{пп} - mR_{пп})R_2 = (R_1 + R_{л})(R_3 + mR_{пп}), \quad (14.99)$$

Вычитая из второго равенства первое и решая относительно m , получим (14.100) /8/

$$m = \Delta R_t \frac{R_2}{R_{пп}(R_1 + R_{л} + R_2)}, \quad (14.100)$$

Отсюда видно, что m — линейная функция ΔR_t . Кроме того, из последнего выражения следует, что, несмотря на трехпроводную схему соединения термопреобразователя сопротивления с мостом, показания последнего зависят от изменения сопротивления соединительных проводов. Однако эта зависимость, как показывают расчеты из различных источников, незначительна и при изменении температуры окружающей среды до $t=40^\circ\text{C}$ изменение сопротивления проводов $R_{л}$ приводит к изменению показаний прибора в пределах (0,05— Ч) % от нормирующего значения измеряемой величины для различных диапазонов измерения. Полностью отсутствует влияние сопротивления соединительных проводов при симметричном мосте, т. е. когда $R_1 = R_t + R_{д} + R_{пп} - mR_{пп}$. Так как это условие может быть реализовано лишь при одной измеряемой температуре, то обычно его выполняют для температуры $t_{сред}$, соответствующей середине диапазона шкалы. При этом $R_1 \approx R_{исре} + R_{д} + R_{пп} / 2$ /8/.

Назначение, устройство и принцип работы основных узлов автоматического моста — модулятора (при питании моста постоянным током), электронного усилителя, реверсивного двигателя, реохорда, записывающего устройства, привода диаграммы, переключателя (в многоточечных приборах) — такие же, как и в автоматических потенциометрах.

Выпускаемые в настоящее время автоматические мосты отличаются друг от друга назначением, конструкцией, размерами, точностью измерения и другими техническими характеристиками, например мосты одноточечные и многоточечные, самопишущие и показывающие с ленточной, а также с дисковой диаграммой: полногабаритные, малогабаритные и миниатюрные с шириной диаграммной ленты соответственно 250, 160 и 100 мм. Классы точности автоматических мостов равны 0,25; 0,5 и 1, а время пробега стрелки всей шкалы 1; 2,5 и 10 с. В автоматические мосты встраиваются электрические и пневматические регулирующие устройства, а также устройства сигнализации;

для дистанционной передачи показаний — преобразователи пневматические, токовые, частотные и др.

14.6.1.2 Неуравновешенные мосты

Неуравновешенные мосты не требуют уравнивания тока, проходящего в его измерительной диагонали. Значение этого тока является мерой подсоединенного к мосту измеряемого сопротивления. Это основное преимущество неуравновешенных мостов.

Неуравновешенные мосты относительно редко используются для измерения температуры. Они широко применяются в различных газоанализаторах, где в качестве чувствительного элемента используются нагреваемые электрическим током металлические или чаще полупроводниковые резисторы. В неуравновешенном мосте (рисунок 14.147) сопротивления трех плеч R_1 , R_2 , R_3 — постоянны, R_6 — реостат в диагонали питания, П — переключатель, с помощью которого к четвертому плечу моста подключается измеряемое сопротивление R_t (положение *И*) или контрольное сопротивление R_K (положение *К*). Значение тока I_d , проходящего через миллиамперметр mA , определяется выражением (14.101) /8/

$$I_d = U_{ab} \frac{R_2 R_t - R_1 R_2}{M}, \quad (14.101)$$

где $M = f(R_1, R_2, R_3, R_t)$.

Несмотря на то что M зависит также от изменяющегося сопротивления R_t , при малых изменениях его значение M можно считать постоянным. Тогда из (14.100) следует, что если напряжение в диагонали ab питания моста U_{ab} постоянно, то ток в измерительной диагонали cd линейно зависит от R_t . Для контроля постоянства значения U_{ab} переключатель из положения *И* время от времени устанавливают в положение *К*. Если значение напряжения U_{ab} равно значению, принятому при градуировке прибора, то в положении *К* значение тока I_d должно быть вполне определенным и стрелка миллиамперметра должна устанавливаться на контрольном значении шкалы, отмеченном цветной линией. В противном случае указанное достигается путем изменения сопротивления реостата R_6 . В последнее время применение стабилизированных источников питания (ИПС) вместо батарей постоянного тока исключает необходимость контрольных процедур проверки постоянства напряжения питания моста. Если в качестве измеряемого сопротивления R_t используются не полупроводниковые резисторы, то с целью исключения погрешности от влияния изменения сопротивления соединительных проводов при изменении их температуры применяют трехпроводную схему соединения R_t с мостом. Для этого точку b диагонали питания ab смещают до термопреобразователя сопротивления.

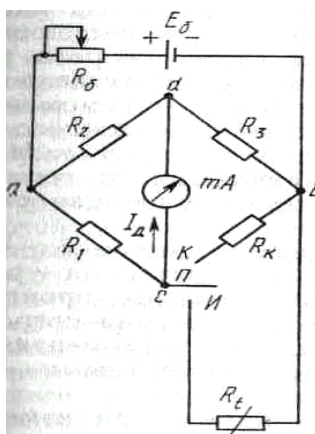


Рисунок 14.147 - Схема неуравновешенного моста

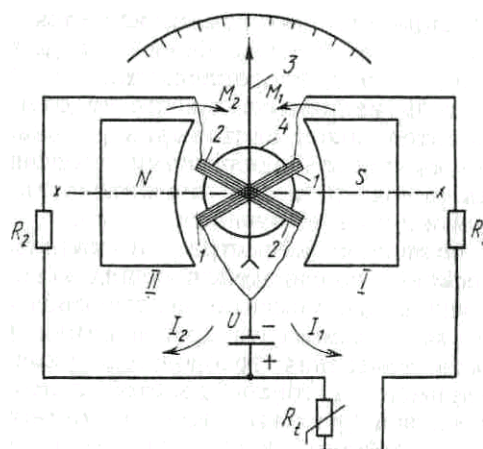


Рисунок 14.148 - Схема магнитоэлектрического логометра

В приборах автоматического аналитического контроля часто бывает необходимо получить информацию о разности двух сопротивлений R_{I1} и R_{I2} . Для этого указанные сопротивления включают в прилегающие плечи неуравновешенного моста, сигнал которого в данном случае представится в виде $I_{\text{д}} = k(R_{I1} - R_{I2})$, где k —коэффициент преобразования.

Логометры

Логометры магнитоэлектрической системы используются в комплекте с термопреобразователями сопротивления для измерения температуры. Логометр со скрещенными рамками (рисунок 14.148) состоит из двух жестко закрепленных между собой рамок 1 и 2, изготовленных из медных изолированных проволок сопротивлением r_1 и r_2 . На общей оси рамок насажена стрелка прибора 8. В кольцевом воздушном зазоре между цилиндрическим сердечником из мягкой стали 4 и полюсными наконечниками вращаются активные стороны рамки. В отличие от милливольтметра воздушный зазор между сердечником и полюсными наконечниками неравномерен и потому магнитное поле здесь распределяется неравномерно. Так, воздушный зазор на оси x — x минимален и увеличивается по обе стороны от этой оси. В

соответствии с этим магнитная индукция в центре максимальна и уменьшается примерно по квадратичному закону по мере удаления от центра к краям полюсных наконечников. Таким образом, магнитная индукция B , пронизывающая активные стороны рамок, является функцией угла поворота рамок φ , т. е. $B = f(\varphi)$. Токи I_1 и I_2 , проходящие соответственно в рамках 1 и 2, направлены так, что возникающие в них моменты M_1 и M_2 направлены навстречу друг другу. Значение каждого из моментов может быть выражено зависимостями $M = cI_1B_1$ и $M_2 = cI_2B_2$, где c —постоянный коэффициент, зависящий от геометрии рамок; B_1 и B_2 —магнитная индукция, пронизывающая рамки 1 и 2 соответственно.

Отличием логометра от милливольтметра является то, что здесь нет противодействующих повороту рамок пружин, а уравнивание момента, действующего в одной из рамок, происходит за счет момента другой рамки. С целью исключения погрешности измерения токоподводы рамок выполняют безмоментным, например из тонкой золотой ленты, или маломоментными — из бронзовой проволоки малого диаметра.

Рассмотрим работу логометра. Пусть, например, при изменении сопротивления R_t увеличится ток I_1 , что приведет к увеличению момента M_1 , который начнет поворачивать подвижную систему против движения часовой стрелки. При этом окажется, что активные стороны рамки 1 будут перемещаться из поля большей магнитной напряженности в поля с меньшей напряженностью. Активные же стороны рамки 2, наоборот, из поля с меньшей магнитной напряженностью в поле с большей напряженностью. В процессе этого перемещения момент M_1 будет уменьшаться, а M_2 расти вследствие уменьшения B_1 и роста B_2 . При некотором угле поворота подвижной системы φ наступит состояние равновесия: $M_1 = M_2$ или $cI_1B_1 = cI_2B_2$, откуда получим выражения (14.102) или (14.103) /8/

$$I_2 / I_1 = B_1 / B_2 = \psi(\varphi), \quad (14.102)$$

$$\varphi = F(I_2 / I_1), \quad (14.103)$$

Из (14.103) следует, что угол поворота подвижной системы φ , или показание логометра, определяется отношением (по-гречески логус) двух токов, что объясняет название прибора — логометр.

Выражая каждый из токов I_1 и I_2 через напряжение питания контуров U и соответствующие сопротивления, имеем выражение (14.104) /8/

$$\varphi = F\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = F\left[\frac{U/(r_2 + R_2)}{U/(R_t + r_1 + R_1)}\right] = F\left(\frac{R_t + r_1 + R_1}{r_2 + R_2}\right), \quad (14.104)$$

В уравнении (14.104) величины r_1 , R_1 , r_2 , R_2 — постоянные, поэтому $\varphi = \psi(R_t)$, т. е. в рассматриваемом случае логометр измеряет сопротивление R_t . В виду того что логометр непосредственно измеряет отношение двух токов, генерируемых от одного источника, изменение напряжения его в определенных пределах не влияет на показания прибора. Это его преимущество. Так как рамки 1 и 2 выполнены из меди, то при изменении температуры окружающей среды сопротивления рамок изменяются, что отражается на показаниях прибора. Для уменьшения влияния температуры последовательно с сопротивлениями r_1 и r_2 рамок включаются добавочные резисторы с сопротивлениями R_1 и R_2 выполненные из манганина. Значения этих сопротивлений много больше, чем r_1 и r_2 . Однако при этом условии вследствие уменьшения токов уменьшается чувствительность логометра. Для увеличения чувствительности логометра и одновременно уменьшения температурного коэффициента прибора используют схему симметричного неравновесного моста, в диагональ которого включаются рамки логометра (рисунок 14.149). Здесь сопротивления резисторов симметричных плеч попарно равны, т. е. $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$ при значении R_t , соответствующем середине диапазона измерения по шкале; R_5 — сопротивление для изменения пределов измерения; R_4 — медное сопротивление для температурной компенсации; R_3 и R_4 — соответственно эквивалентное и уравнивающее сопротивления, служащие для подгонки сопротивления соединительной линии. Приведенная схема позволяет для логометров класса точности 1,5 иметь дополнительную погрешность не более $\pm 0,75$ % от значения диапазона измерения на каждые 10°C изменения температуры окружающей среды в пределах от 5 до 50°C . Подключение измеряемого сопротивления R_t к логометру можно осуществлять как по двухпроводной, так и при необходимости по трехпроводной схеме.

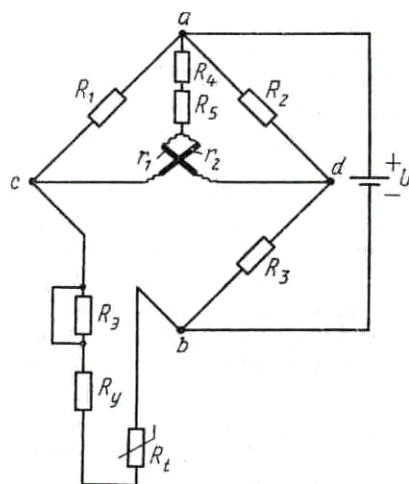


Рисунок 14.149 - Схема логометра, включённого в мостовую схему

Логометры бывают показывающими, самопишущими, многотомными и, кроме того, могут иметь встроенные устройства для сигнализации и регулирования. Классы точности промышленных логометров: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5.

14.6.1.3 Нормирующие преобразователи

Для введения информации, получаемой с помощью термопреобразователя сопротивления, в ЭВМ или в систему автоматического регулирования используются нормирующие токовые преобразователи, формирующие на своем выходе сигнал постоянного тока 0—5 мА. Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термопреобразователем сопротивления, показана на рисунке 14.150. Этот преобразователь по схеме и принципу действия аналогичен нормирующему преобразователю, работающему в комплекте с термоэлектрическим преобразователем. Отличие указанных схем заключается в том, что в преобразователе (рисунок 14.144) вместо корректирующего моста $KМ$ используется измерительный неравновесный мост $ИМ$, в одно из плеч которого по трехпроводной схеме подсоединен термопреобразователь сопротивления R_t . Остальные сопротивления выполнены из манганина. Сопротивления R_L служат для подгонки сопротивления соединительных проводов к номинальному значению. К диагонали питания моста ab подведено стабилизированное напряжение постоянного тока. Выходной ток преобразователя $I_{ВЫХ}$ пропорционален напряжению U_{cd} в измерительной диагонали моста, и соотношение между ними может быть представлено в соответствии с (14.93) выражением (14.105) /8/

$$I_{ВЫХ} = kU_{cd}, \quad (14.105)$$

Так как $U_{cd} = k_M R_t$ где k_M — коэффициент преобразования моста, то получим выражение (14.106) /8/

$$I_{ВЫХ} = k k_M R_t, \quad (14.106)$$

Таким образом, токовый сигнал нормирующего преобразователя пропорционален сопротивлению термопреобразователя сопротивления. Классы точности рассматриваемого преобразователя 0,6—1,5.

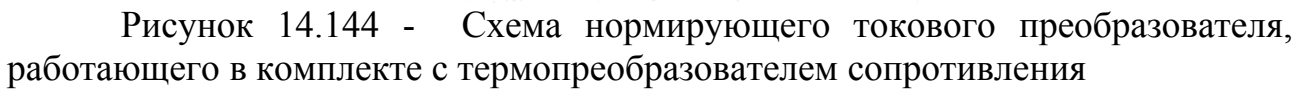


Рисунок 14.144 - Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термопреобразователем сопротивления

15 Электрические измерения /8, 10,11,14/

Различные физические величины имеют разную физическую природу, поэтому отличаются их методы и средства измерений. Для удобства разработки или выбора тех или иных методов и средств измерений все физические величины делятся на электрические, магнитные и неэлектрические.

Характерной особенностью современных измерений является то, что не только электрические и магнитные, но и большинство неэлектрических величин измеряются электрическими методами, т.е. путем предварительного преобразования неэлектрической величины в электрическую. Это обусловлено следующими достоинствами электрических измерений: - электрические величины удобно передавать на расстояние, причем передача осуществляется с высокой скоростью; - электрические величины универсальны в том смысле, что любые другие величины могут быть преобразованы в электрические и наоборот; - электрические величины легко, точно и быстро преобразуются в цифровой код; - электрические измерения позволяют достигнуть высокой точности, чувствительности и быстродействия средств измерений.

Автоматизация технологических процессов во всех отраслях народного хозяйства приводит как к возрастанию общего объема электрических измерений физических величин, так и к изменению доли тех или иных физических величин в общем объеме. В настоящее время существует примерно следующее распределение доли измерений различных физических величин в промышленности: - температура 50 %, расход (массовый и объемный) 15 %, давление 10 %, уровень 5 %, количество (масса, объем) 5 %, время 4 %, данные материалов (аналитические измерения) 4 %, электрические и магнитные величины менее 5 %. Отсюда видно, что подавляющее число измерений представляет собой измерения неэлектрических величин. При этом представляет интерес также абсолютный объем выполняемых измерений. Так, на атомной электростанции среднего размера имеется около 3000 точек измерений различных физических величин. На крупном предприятии химической промышленности только для измерения температур имеется около 20000 точек измерений. Таким образом, уже в настоящее время измерения физических величин - это массовый процесс, причем основную его долю составляют измерения неэлектрических величин. С большим основанием можно утверждать, что эта тенденция сохранится и будет развиваться в будущем.

Аналоговые и цифровые измерительные приборы и измерительные преобразователи предназначены главным образом для прямых измерений электрических величин: - постоянных токов и напряжений, параметров сигналов переменного тока, электрической мощности, расхода энергии, параметров электрических цепей и т.д. Знание их возможностей и принципа действия позволяет квалифицированно решать задачу измерений большинства электрических величин. Далее излагаются основные методы и средства измерений неэлектрических величин, причем основное внимание уделено методам преобразования различных неэлектрических величин в электрические.

15.1 Измерение электрических величин аналоговыми и цифровыми преобразователями и измерительными приборами

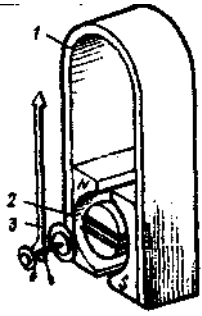
Аналоговые электромеханические СИ включают в себя измерительную цепь, измерительный механизм, отсчетное устройство со шкалой и метрологическими характеристиками на ней. Измерительный механизм преобразует входной электрический сигнал в механическую энергию перемещения подвижной части. Перемещение, в основном, представляет собой поворот подвижной части относительно неподвижной оси на какой либо угол α .

Отсчетное устройство – указатель (стрелка), перо, жестко связанного с подвижной частью измерительного механизма, и неподвижной шкалой (бумажным носителем, совмещающим функции шкалы и носителя регистрируемой информации). Подвижная часть преобразует угловое перемещение механизма в перемещение указателя, при этом величина α отсчитывается в единицах деления шкалы.

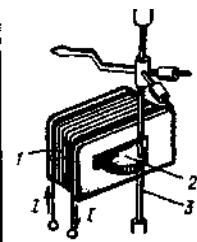
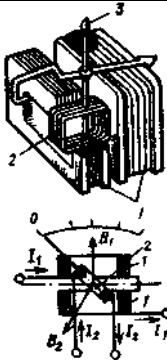
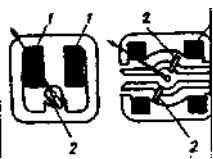
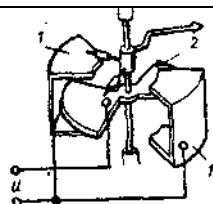
Вращающий момент $M_{вр.}$, действующий на подвижную часть, определяется производной от энергии поля по углу отклонения подвижной системы СИ по формуле: - $M_{вр.} = d W_1 / d\alpha$, где W_1 – энергия магнитного поля системы контуров с токами или энергия электрического поля системы заряженных тел. В зависимости от характера явления, используемого для создания вращающего момента, различают следующие системы электромеханических СИ: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, индукционную. В любом из этих СИ действуют также уравнивающий противодействующий момент M_{α} , зависящий от α и направленный в сторону, противодействующую $M_{вр.}$. В зависимости от способа создания противодействующего момента M_{α} электромеханические СИ подразделяются на две группы: - с механическим противодействующим моментом; - с электрическим противодействующим моментом (логометры).

Характеристики электромеханических измерительных механизмов представлены в таблице 15.1

Таблица 15.1 – Характеристики электромеханических измерительных механизмов

Тип измерительного механизма	Кинематическая схема механизма	Вращающий момент	Уравнение шкалы	Примечание
1	2	3	4	5
Магнито-электрический		$M = B_s W I;$	$a = \frac{B_s w}{W} I$ или $a = S I$	I – ток в обмотке рамки; S – чувствительность, s – акт. пл. рамки, w – число витков обмотки, B – индукция, W – уд. пр. момент.

Продолжение таблицы 15.1

1	2	3	4	5
Электро- магнит- ный		$M = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{da}$	$a = \frac{1}{2W} I^2 \times \frac{dL}{da}$	I – ток в обмотке катушки; L – индуктивность катушки
Электро- динами- ческий		Общее выражение $M = I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{da}$ $\frac{1}{W} I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{da}$ Для переменного тока $M = I_1 I_2 \cos \phi \frac{dM_{1,2}}{da}$ $a = \frac{1}{W} \cos \phi \frac{dM_{1,2}}{da}$		I_1 – ток подвижной катушки; I_2 – ток неподвижных катушек; $M_{1,2}$ – взаимная индуктивность между подвижными и неподвижными катушками; ϕ – угол сдвига между токами I_1 и I_2 .
Ферродинамический		$M = K I_1 I_2 \cos(\theta_1, \theta_2)$	$a = K I_1 I_2 \cos(\theta_1, \theta_2)$	K, K_1 – коэффициенты, определяемые конструкцией измерительных механизмов и выбором системы единиц
Электростатический		$M = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{da}$	$a = \frac{1}{2W} U^2 \frac{dC}{da}$	U – напряжение между электродами; C – емкость между электродами

С развитием электроники, особенно полупроводниковой и микропроцессорной и вычислительной электроники, электромеханические СИ

частью дополнены электронной модернизацией, частью переоборудованы в электронные СИ, но в основном, вновь созданы в группу электронных аналоговых СИ. Электронные СИ отличаются высоким быстродействием, широким частотным диапазоном, высокой чувствительностью. Применение интегральных микросхем приводит к дальнейшему увеличению разрешительных способностей, стабильности и надежности СИ, к уменьшению их размеров, массы и потребления энергии. Многие вольтметры, осциллографы, частотомеры, фазометры и др. строятся на основе электронных приборов. В вышеприведенных разделах измерения давления и температуры были рассмотрены и аналоговые и аналого-электронные схемы приборов и преобразователей, примеры их можно расширять бесконечно, благо, что номенклатура таких приборов весьма обширна. Для примера приводятся - осциллографы для измерений радиотехнического и электронного назначений. Осциллографы используют для наблюдения и записи быстро протекающих процессов.

По принципу действия осциллографы существуют трех типов: электромеханический, электронный, электронно-лучевой.

Электромеханический осциллограф состоит из следующих узлов: вибраторов, оптической системы, приспособления для наблюдения и фотографирования исследуемого тока. Вибратор представляет собой натянутую бронзовую ленточку в виде петли и находится в поле постоянного магнита. Ток, проходящий по петле, взаимодействует с полем постоянного магнита, в результате чего появляется вращающий момент, под действием которого петля и прикрепленное к ней зеркальце повернуться в ту или иную сторону в зависимости от направления тока в петле, а угол отклонения будет пропорционален мгновенному значению тока. Луч света от лампы через диафрагму и фокусирующую линзу попадает на зеркальце вибратора. Отраженный от него луч через фокусирующую линзу падает на поверхность движущейся светочувствительной бумаги или киноплетки. Часть луча света с помощью призмы отбрасывается на вращающийся многогранный зеркальный барабан и отражается от него на матовый экран. При одновременном движении луча света, отраженного от колеблющегося зеркальца, и равномерном вращении барабана луч света вычертит на экране кривую исследуемого тока.

Осциллографы могут иметь несколько десятков вибраторов для одновременной записи нескольких различных процессов на фотобумаге (киноплёнке), скорость движения которой устанавливается в пределах от 1 до 5000 мм / с. Электромеханические осциллографы могут записывать процессы с частотой от нуля до 5 – 10 кГц.

Электронный осциллограф позволяет наблюдать периодические процессы с частотой до сотен мегагерц. Основной частью осциллографа является вакуумная электронно-лучевая трубка. Под действием тока накала катод К излучает электроны, которые с помощью сетки и анодов А1 и А2 формируются в электронный луч и направляются на экран, покрытый слоем люминофора. Измеряемое напряжение прикладывается к паре горизонтально расположенных пластин; вторая пара пластин расположена вертикально, и к

ней приложено периодически изменяющееся во времени линейное напряжение «развертки». Если частоты периодических напряжений совпадают, то светлое пятно на экране за время T будет следовать с постоянной скоростью по горизонтали и одновременно смещаться по вертикали под действием напряжения, прочерчивая в результате кривую исследуемого напряжения.

Электронно-лучевой осциллограф используется для визуального наблюдения, измерения и регистрации формы и параметров электрических сигналов в диапазоне частот от постоянного тока до десятков мегагерц.

Электронно-лучевые осциллографы обладают высокой чувствительностью и малой инерционностью, подразделяются на универсальные, запоминающие, специальные и др., могут быть одно-, двух- и многолучевыми.

В настоящее время существует огромное количество моделей осциллографов. Рассмотрим некоторые из них.

Осциллограф АКТАКОМ АСК- 1021 с шириной полосы пропускания 25 МГц

Данный осциллограф является прибором лабораторного типа. Простота в обращении и высокая надежность делают его идеальным прибором с превосходными характеристиками для широкого спектра измерений, необходимых в исследованиях, производстве, в сфере образования и во многих других сферах применения.

Осциллограф С8 – 33

Осциллограф двухканальный цифровой запоминающий С8 – 33 предназначен для оперативного исследования однократных сигналов с максимальной частотой дискретизации 20 Мвыб / с и периодических сигналов с максимальным временем разрешения 100 пс в полосе частот от 0 до 20 МГц размахом от 10 мВ до 16 В (до 160 В с внешним делителем 1:10) путем регистрации их в цифровой памяти, отображения на экране электронно-лучевой трубки и цифрового измерения амплитудных и временных параметров. В осциллографе устанавливается интерфейс для устройств с последовательным обменом информацией в соответствии с рекомендациями. Область применения осциллографа: ремонт, наладка, эксплуатация различных электронных приборов и узлов автоматики, вычислительной техники, связи, сложной электронной техники, научные исследования.

Осциллограф универсальный С1-65

Осциллограф универсальный С1-65 предназначен для исследования формы электрических сигналов путем визуального наблюдения и измерения их амплитудных и временных параметров в цеховых, лабораторных и полевых условиях эксплуатации.

Прибор удовлетворяет требованиям ГОСТ 22261-94, нормалей Н0.005.026-030, а по условиям эксплуатации приборов к 7 группе нормали Н0.005.026.

Осциллограф С1-104

Осциллограф универсальный С1-104 предназначен для визуального наблюдения и измерения параметров периодических и однократных электрических процессов в диапазоне частот от постоянного тока до 500 МГц путем:

- измерения амплитудных и временных параметров исследуемого сигнала в диапазоне от 0,04 до 8 В, с выносным делителем 1:10 И22. 727. 082 – до 10 В, с активным пробником И22.746. 036 – до 24 В и временных интервалов в диапазоне от $4 \cdot 10^{-9}$ до 0,5 с;
- одновременного изображения двух исследуемых сигналов на одной развертке.

Осциллограф предназначен для работы в лабораторных и цеховых условиях и может использоваться для исследовательских, поверочных и ремонтных работ.

По метрологическим характеристикам осциллограф С1-104 соответствует II классу точности.

Осциллограф-мультиметр С1-155

Осциллограф-мультиметр С1-155 предназначен для визуального наблюдения, электрических сигналов.

Прибор позволяет измерять как периодические, так и однократные электрические сигналы. Имеет встроенный интерфейс RS-322 и встроенный мультиметр.

Создание прибора преследует цель заменить устаревший парк универсальных запоминающих осциллографов, повысить удобство их эксплуатации, уменьшить погрешность измерений амплитудно-временных параметров исследуемых сигналов при существенном снижении массы, габаритов и потребляемой мощности.

Осциллограф универсальный С1-77

Универсальный осциллограф С1-77 предназначен для исследования формы электрических сигналов путем визуального наблюдения в диапазоне частот от 0 до 10 МГц, измерения размахов в диапазоне от 0,01 до 200 В и временных интервалов от $0,08 \cdot 10^{-6}$ до 0,4 с.

Наличие двух каналов вертикального отклонения обеспечивает одновременное исследование двух сигналов на одной развертке.

Осциллограф относится ко II классу точности.

Осциллограф предназначен для использования при разработке, настройке и регулировке радиоэлектронной аппаратуры в лабораторных, цеховых и полевых условиях.

Осциллограф С1-125

Осциллограф С1-125 предназначен для исследования формы периодических электрических сигналов путем визуального наблюдения их формы, измерения амплитуды и временных параметров методом калиброванной шкалы.

Двухканальный осциллограф С1-125 с полосой пропускания 10 МГц отличается компактной конструкцией, небольшой массой и простотой управления.

Имеет повышенную надежность, прост по конструкции в эксплуатации. Применяется при проектировании, наладке и ремонте электронной аппаратуры в лабораторных, цеховых и полевых условиях.

Осциллограф С1-159

Осциллограф С1-159 предназначен для наблюдения и измерения электрических сигналов в реальном масштабе времени в диапазоне напряжений от 8 мВ до 60 В и длительностей от 80 нс до 0,2 с в полосе частот от 10 Гц до 10 МГц. Может применяться при производстве, разработке и эксплуатации радиоэлектронных изделий, а также в ходе учебного процесса в школах, вузах по курсам электротехники, электроники и т. д.

Осциллограф С8-23

Осциллограф предназначен для исследования и измерения периодических сигналов в полосе частот 0 – 20 МГц и однократных сигналов, регистрируемых с максимальной частотой дискретизации 1 МГц. Прибор обеспечивает цифровое запоминание, цифровое измерение напряжения в диапазоне амплитуд от 5 мВ (с активным пробником – от 5 мВ) до 80 В (с делителем – до 200 В) и временных интервалов в диапазоне длительностей от 200 нс до 8000 с. Кроме этого, производится автоматическая обзорная установка размеров изображения в пределах рабочей части экрана, автоматическое измерение размаха, периода и длительности с выводом результатов измерения на экран электронно-лучевой трубки.

Осциллограф имеет самодиагностику и выход в канал общего пользования (КОП). Размеры рабочей части электронно-лучевой трубки оставляют 80 мм (10 делений) по горизонтали и 60 мм (8 делений) по вертикали.

Структурная схема осциллографа

Слово «осциллограф» образовано от «осциллум» – колебания и «графо» – пишу. Отсюда и назначение этого измерительного прибора – отображать на экране кривые тока или напряжения как функции времени. Встречается и другое название этого прибора – осцилоскоп – прибор для наблюдения формы колебаний.

Основная деталь электронного осциллографа – электронно-лучевая трубка (рисунок 15.1), напоминающая по форме телевизионный кинескоп. Экран трубки покрыт изнутри люминофором – веществом, способным светиться под «ударами» электронов. Чем больше поток электронов, тем ярче свечение той части, куда они попадают.

Испускаются же электроны так называемой электронной пушкой, размещенной на противоположном от экрана конце трубки. Она состоит из подогревателя (нити накала) и катода. Между «пушкой» и экраном размещены модулятор – регулирующий поток летящих к экрану электронов, двух анодов – создающих нужное ускорение пучку электронов и его фокусировку, и двух пар пластин, с помощью которых электроны можно отклонять по горизонтальной (X) и вертикальной (Y) осям. Экран электронно-лучевой трубки будет светиться лишь при подаче на ее электроды определенных напряжений. На нить накала обычно подают переменное напряжение, на управляющий электрод (модулятор) постоянное, отрицательной полярности, по отношению к катоду, на аноды – положительное, причем на первом аноде (фокусирующем) напряжение значительно меньше, чем на втором (ускоряющем). На

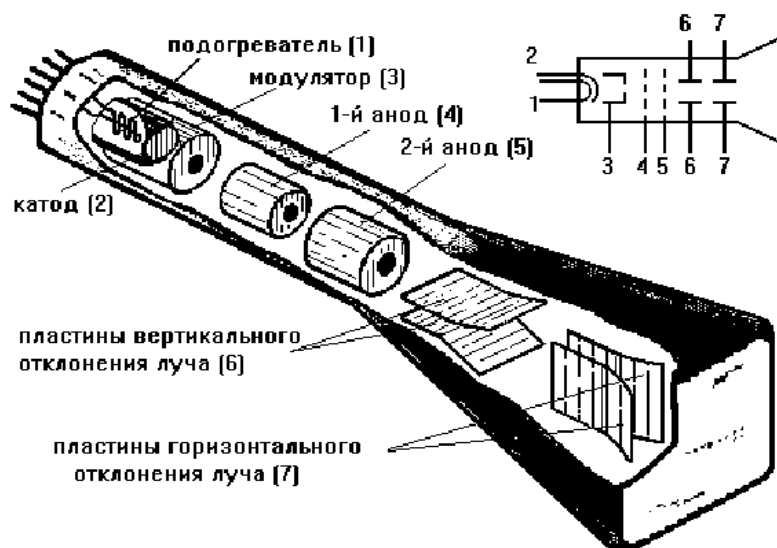


Рисунок 15.1 – Электронно-лучевая трубка

пластины подается как постоянное напряжение, позволяющее смещать пучок электронов в любую сторону, относительно центра экрана, так и переменное, создающее линию развертки той или иной длины, а также "рисующей" на экране форму исследуемых колебаний. Чтобы представить, как же получается

на экране изображение колебаний, изобразим условно экран трубки в виде окружности и поместим внутри нее отклоняющие пластины (рисунок 15.2). Если подвести к горизонтальным пластинам $X1$ и $X2$ пилообразное напряжение, на экране появится светящаяся горизонтальная линия – ее называют линией развертки или просто разверткой. Длина ее зависит от амплитуды пилообразного напряжения (рисунок 15.2 а).

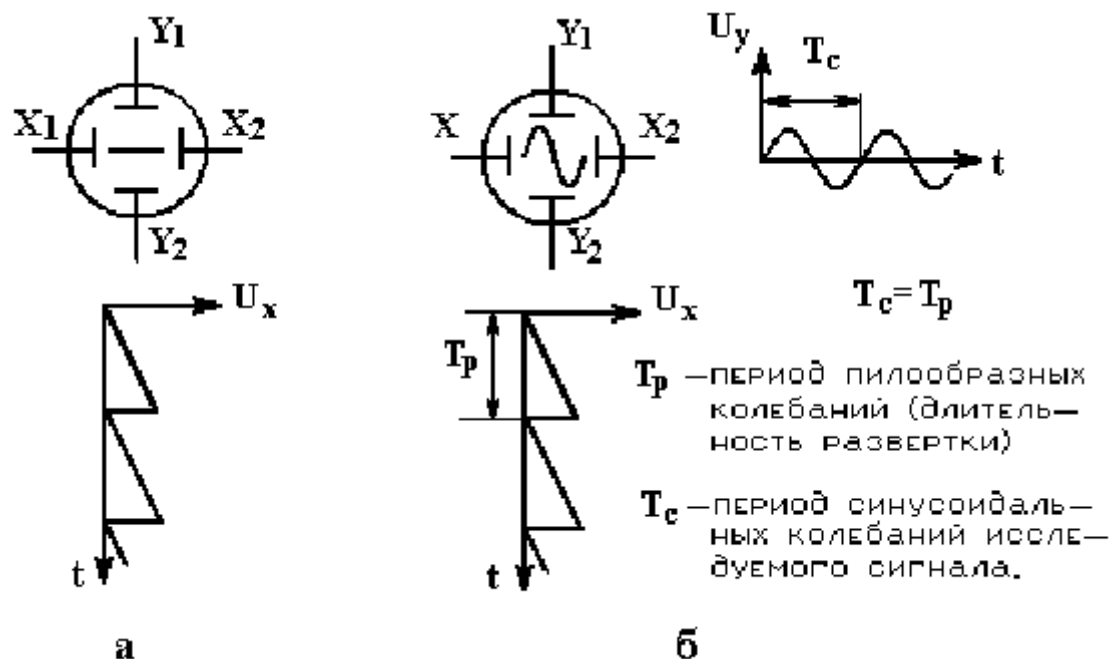


Рисунок 15.2 – Условные изображения экрана трубки

Если теперь одновременно с пилообразным напряжением, поданным на пластины $X1$ и $X2$, подать на другую пару пластин (вертикальных – $Y1$, $Y2$), например, переменное напряжение синусоидальной формы, линия развертки в точности «изогнется» по форме синусоидального и пилообразного колебаний, на экране будет изображение одной «синусоиды» (рисунок 15.2 б). При неравенстве же периодов на экране появится столько полных колебаний, сколько периодов их укладывается в периоде колебаний пилообразного напряжения развертки. В осциллографе есть регулировка частоты развертки, с помощью которой добиваются нужного числа наблюдаемых на экране колебаний исследуемого сигнала.

На рисунке 15.3 изображена структурная схема осциллографа. На сегодняшний день существует большое число различных по конструкции и назначению осциллографов. По-разному выглядят их лицевые панели (панели управления), несколько отличаются названия ручек управления и переключатели. Но в любом осциллографе существует минимально необходимый набор узлов, без которых он не может работать.

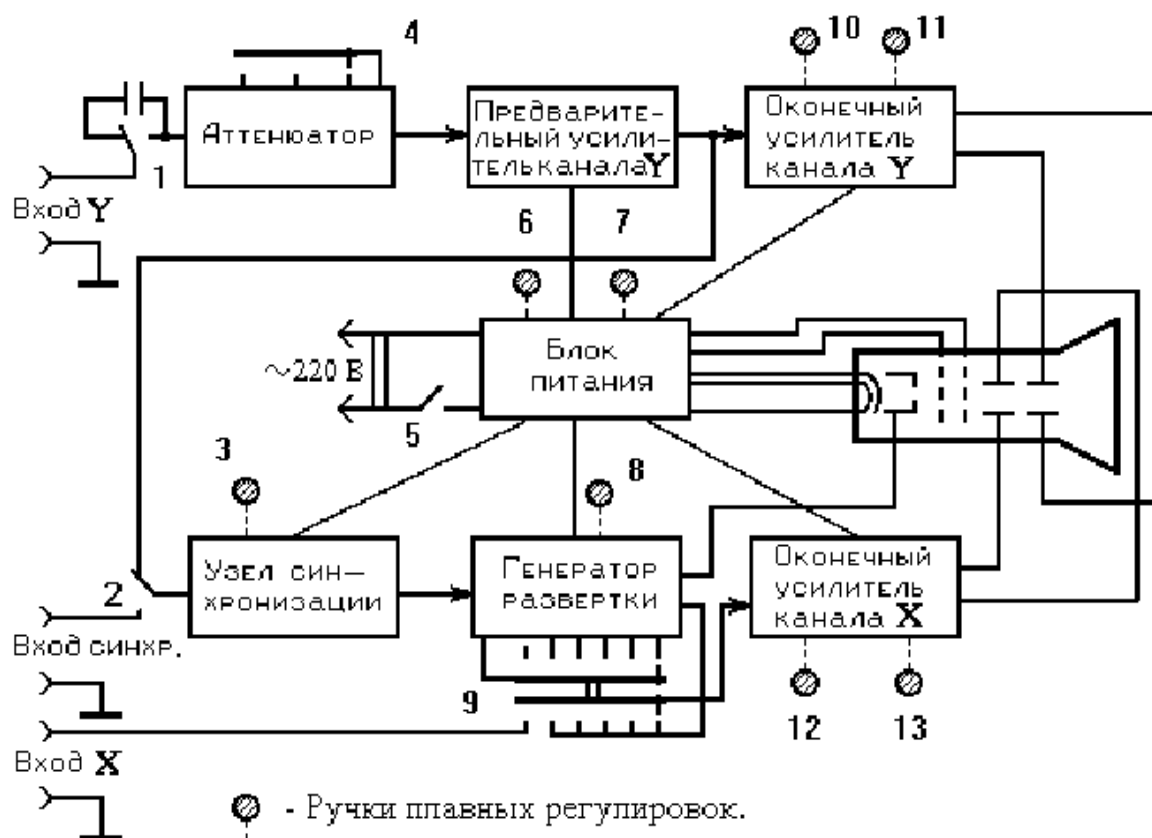


Рисунок 15.3 – Структурная схема осциллографа

Рассмотрим назначение этих основных узлов. Блок питания обеспечивает энергией работу всех узлов электронного осциллографа. На вход блока питания поступает переменное напряжение от городской электросети, как правило, величиной 220 В. В нем оно преобразуется в напряжения разной величины: переменное 6,3 В для питания нити накала электронно-лучевой трубки, постоянное напряжение 12–24 В для питания усилителей и генератора, если они полупроводниковые (или 250 В, если ламповые), около 150 В для питания окончных усилителей горизонтального и вертикального отклонения луча, несколько сотен вольт для фокусировки электронного луча и несколько тысяч вольт для ускорения электронного пучка. Из блока питания, кроме выключателя питания 5, выведены на переднюю панель осциллографа регуляторы: «Фокусировка» 6 и «Яркость» 7. При вращении этих ручек изменяются напряжения, подаваемые на первый анод и модулятор. При изменении напряжения на первом аноде, меняется конфигурация электростатического поля, что приводит к изменению ширины электронного луча. Модулятор в электронно-лучевой трубке выполняет роль управляющей сетки в ламповом триоде. При изменении напряжения на модуляторе изменяется ток электронного луча (изменяется кинетическая энергия электронов), что приводит к изменению яркости свечения люминофора экрана.

Генератор развертки выдает пилообразное напряжение, частоту которого можно изменять грубо (ступенями) переключателем 9 и плавно – регулятором 8. На лицевой панели осциллографа они называются «Частота

грубо» (или «Длительность развертки») и «Частота плавно». Диапазон частот генератора весьма широк – от единиц герц до единиц мегагерц. Правда, около переключателя диапазонов проставлены значения длительности (продолжительности) пилообразных колебаний, а не их частоты. Нужно уметь находить по длительности частоту, и наоборот. Делают это по формуле (15.1)

$$f = 1/T, \quad (15.1)$$

где f – частота колебаний;

T – длительность (или период) одного колебания.

С генератора развертки сигнал подается на усилитель канала горизонтального отклонения. Этот усилитель необходим для получения такой амплитуды пилообразного напряжения, при которой электронный луч отклоняется на весь экран. В усилителе расположены регулятор длины линии развертки 12 (на передней панели осциллографа он называется «Усиление X» или «Амплитуда») и регулятор смещения линии развертки по горизонтали 13 (обозначен значком). Канал вертикальной развертки состоит из входного аттенюатора (делителя входного сигнала) и двух усилителей – предварительного и окончного. Аттенюатор позволяет выбирать нужную высоту рассматриваемого изображения в зависимости от амплитуды исследуемых колебаний. С помощью переключателя входного аттенюатора 4, амплитуду сигнала можно уменьшить в 10 или 100 раз. Около переключателя стоят надписи 1:1 – в этом случае входной сигнал не ослабляется; 1:10 и 1:100 – в этих случаях ослабление соответственно в 10 и 100 раз. Более плавные изменения уровня сигнала, а значит и размера изображения на экране, получают с помощью регулятора чувствительности окончного усилителя канала Y 10. В окончном усилителе этого канала, как и канала горизонтального отклонения, есть регулировка смещения луча 11, а значит, и изображения по вертикали. Кроме того, на входе канала вертикального отклонения стоит переключатель 1 б с помощью которого можно либо подавать на усилитель постоянную составляющую исследуемого сигнала, либо избавляться от нее включением разделительного конденсатора. Это в свою очередь позволяет пользоваться осциллографом как вольтметром постоянного тока, способным измерять постоянные напряжения.

Кроме переключателя 9 и регулятора 8 длительности развертки у генератора развертки есть еще один переключатель – переключатель режима работы развертки. Он также выведен на переднюю панель осциллографа. Генератор разверток может работать в двух режимах: в автоматическом – генерирует пилообразное напряжение заданной длительности и в ждущем режиме – «ожидает» прихода входного сигнала, и с его появлением запускается. Этот режим бывает, необходим при исследовании сигналов появляющихся случайно, либо при исследовании параметров импульса, когда его передний фронт должен быть в начале развертки. В автоматическом режиме

работы случайный сигнал может появиться в любом месте развертки, что усложняет его наблюдение.

Если между генератором развертки и сигналом нет никакой связи, то начинаться развертка и появляться сигнал будут в разное время, изображение сигнала на экране осциллографа будет перемещаться либо в одну, либо в другую сторону – в зависимости от разности частот сигнала и развертки. Чтобы остановить изображение нужно «засинхронизировать» генератор, т.е. обеспечить такой режим работы, при котором начало развертки, будет совпадать с началом появления периодического сигнала. Причем синхронизировать генератор можно как от внутреннего сигнала, так и от внешнего, подаваемого на гнезда «Вход синхр.». Плавно регулируется синхронизация регулятором 5. Эту ручку можно поворачивать от крайнего левого положения до крайнего правого. Это регулировка синхронизации развертки от сигнала соответствующей полярности. Когда ручка 5 находится в крайнем левом положении – знак (–) генератор развертки синхронизируется отрицательным фронтом синусоидального напряжения, в крайнем правом – знак (+) – положительным. В среднем положении ручки синхронизация выключается.

Осциллограф – мультиметр С1-107 - предназначен для исследования формы сигналов в диапазоне частот от 0 до 5 МГц путем визуального наблюдения и измерения их амплитуд в диапазоне от 0,02 до 120 В (с выносным делителем 1:10 до 350) и временных интервалов от $0,4 \cdot 10^{-6}$ до 1,0 с в режиме осциллографа; Измерения напряжений постоянного тока от $1 \cdot 10^{-3}$ до 1000 В, переменного тока от $1 \cdot 10^{-3}$ до 300 В, силы постоянного тока от $1 \cdot 10^{-6}$ до 1,999 А, активного сопротивления от $1 \cdot 10^{-3}$ до 1999 кОм в режиме мультиметра. Осциллограф-мультиметр относится к 3 классу точности. Регулировка по яркости обеспечивает изменения яркости изображения от полного отсутствия до удобной для наблюдения. Электрическая изоляция цепи питания между входом сетевого кабеля и корпусом прибора выдерживает в течение 1 мин испытательное напряжение переменного тока частотой (50 ± 1) Гц, среднеквадратическое действующее значение которого соответствует: 1500 В в нормальных условиях; 900 В в условиях повышенной влажности.

Допускается непрерывная работа осциллографа-мультиметра в рабочих условиях в течение 16 ч, при сохранении своих технических характеристик.

Осциллограф-мультиметр сохраняет свои характеристики при питании: от сети переменного тока напряжением (220 ± 22) В, частотой $(49,5 - 60,5)$ Гц и содержанием гармоник до 5 %; от сети переменного тока напряжением $(115 \pm 5,75)$ В и (220 ± 11) В, частотой (400 ± 12) Гц и содержанием гармоник до 5 %; от источника постоянного тока напряжением $(27 \pm 2,7)$ В.

Осциллограф-мультиметр сохраняет свои характеристики в пределах норм после замены в нем электронно-лучевой трубки.

Напряжение промышленных радиопомех, создаваемых осциллографом-мультиметром, не превышает: 80 дБ на частотах от 0,15 до 0,5 МГц; 74 дБ на частотах от 0,5 до 2,5 МГц; 66 дБ на частотах от 2,5 до 20 МГц. Нарботка на

отказ – не менее 3750 часов. Среднее время восстановления осциллографа-мультиметра не более 2 ч. Вероятность отсутствия скрытых отказов не менее 0,96 за межповерочный интервал 12 месяцев при среднем коэффициенте использования 0,08. Осциллограф-мультиметр по устойчивости к воздействию статического электричества относится к II степени жесткости. Величина допускаемого значения статического электричества не должна превышать 100 В. Режим осциллографа Рабочая часть экрана осциллографа: 60 мм (10 делений, цена деления 6 мм) по горизонтали: 40 мм (6 2/3 делений, цена деления 6 мм) по вертикали. Ширина линии луча не превышает 0,8 мм. Пределы допускаемого значения относительной основной погрешности коэффициентов отклонения по вертикали (0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20 В/дел) равны $\pm 4\%$ при размере изображения от 6 до 5 делений включительно и $\pm 8\%$ при размере изображения от 5 до 2 делений включительно. Пределы допускаемого значения относительной погрешности коэффициентов отклонения в интервале влияющего фактора равны $\pm 12\%$. Коэффициент отклонения плавно регулируется с перекрытием не менее чем в 2,5 раза. Время нарастания переходной характеристики канала вертикального отклонения при непосредственном входе и с выносным делителем 1: 10 не превышает 70 нс. Выброс переходной характеристики канала вертикального отклонения при непосредственном входе и с выносным делителем 1: 10 – не превышает 5 %. Время установления переходной характеристики канала вертикального отклонения при непосредственном входе и с выносным делителем 1: 10 не превышает 210 нс. Неравномерность переходной характеристики при непосредственном входе и с выносным делителем 1: 10 не превышает 4% на участке установления и 3 % за пределами участка установления. Спад вершины переходной характеристики канала вертикального отклонения при закрытом входе за время 10 мс не превышает 10 % при непосредственном входе и с выносным делителем 1: 10. Полоса пропускания тракта вертикального отклонения – от 0 до 5 МГц. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики в нормальном диапазоне частот 0 ... 1 МГц находится в пределах $\pm 8\%$ относительно уровня на опорной частоте 1 кГц. Дрейф луча канала вертикального отклонения после времени установления рабочего режима не превышает кратковременный – 1 мВ за любую минуту в течение часа; долговременный – 5 мВ/ч. Смещение луча из-за входного тока не превышает 5 мВ. Периодические или случайные отклонения не превышают 1 мВ. Пределы перемещения луча по вертикали составляют не менее двух значений номинального вертикального отклонения. Параметры канала вертикального отклонения: входное активное сопротивление – $(1 \pm 0,02)$ МОм с параллельной емкостью от (35 ± 5) пФ при непосредственном входе; входное активное сопротивление $(1 \pm 0,02)$ МОм с параллельной емкостью не более 12 пФ с выносным делителем 1:10. Допускаемое суммарное значение постоянного и переменного напряжения при закрытом входе канала вертикального отклонения находится в пределах: 200 В при непосредственном входе; 350 В с выносным делителем 1:10. Задержка изображения сигнала в канале вертикального отклонения обеспечивает

просмотр фронта исследуемого сигнала на рабочей части развертки и составляет не менее 20 нс. Рабочей частью развертки является участок длиной 10 делений от начала за исключением начального участка длиной 0,2 деления. Генератор развертки обеспечивает следующие режимы работы: автоколебательный, ждущий. Пределы допускаемого значения относительной основной погрешности коэффициентов развертки: (0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; $1 \cdot 10(E3)$; $2 \cdot 10(E3)$; $5 \cdot 10(E3)$; $1 \cdot 10(E4)$; $2 \cdot 10(E4)$; $5 \cdot 10(E4)$; $1 \cdot 10(E5)$ мкс/дел) равны $\pm 5 \%$ при размере изображения по горизонтали; от 10 до 8 делений включительно, и ± 8 при размере изображения от 8 до 4 делений включительно. Пределы допускаемого значения относительной погрешности коэффициентов развертки в интервале влияющей величины равны $\pm 12 \%$. Длительность развертки плавно регулируется на каждом диапазоне с перекрытием не менее чем в 2,5 раза. Пределы перемещения луча по горизонтали составляют не менее одного значения номинального горизонтального отклонения и обеспечивают совмещение начала и конца рабочей части развертки с центром экрана. Коэффициент отклонения канала горизонтального отклонения не превышает 1 В/дел. Входное активное сопротивление входа канала горизонтального отклонения составляет не менее 30 кОм с параллельной емкостью не более 30 пФ. Внутренняя синхронизация осуществляется синусоидальными сигналами в полосе частот от 1 до $5 \cdot 10(E6)$ Гц и импульсами обеих полярностей длительностью от 0,3 до $1 \cdot 10(E6)$ мкс.

Внешняя синхронизация развертки осуществляется синусоидальными сигналами в полосе частот от 1 до $5 \cdot 10(E6)$ Гц и импульсными сигналами обеих полярностей длительностью от 0,3 до $1 \cdot 10(E6)$ мкс с амплитудой от 0,5 до 50 В. Нестабильность синхронизации не превышает 10 нс.

В автоколебательном режиме развертки нижняя частота запуска развертки составляет не более 100 Гц. Параметры входов (открытых) внешней синхронизации: входное активное сопротивление входа “0,5 – 5” – не менее 30 кОм с параллельной емкостью не более 30 пФ; входное активное сопротивление входа “5 – 50” – не менее 650 кОм с параллельной емкостью не более 10 пФ. Внутренний источник калиброванного сигнала генерирует П-образные импульсы с частотой повторения 1 кГц и амплитудой 1 В. Пределы допускаемого значения относительной погрешности установки амплитуды и частоты импульсов калибратора равны: основной $\pm 2 \%$, в интервале влияющей величины $\pm 3 \%$. Геометрические искажения не превышают $\pm 3 \%$.

Режим мультиметра. Выбор вида и пределов измерений производится вручную при помощи переключателя рода работ (“R, –, ~”) и ручки пределов измерения (совмещенной с ручкой аттенюатора). При измерении напряжения или силы постоянного тока определение и индикация полярности производится автоматически. При измерении электрических величин, значения которых превышают конечное значение выбранного предела, индицируется знак “П”. Индикация запятой в зависимости от положения переключателя пределов измерений соответствует таблице 15.2.

Таблица 15.2 – Индикация запятых

Положение переключателя пределов Измерений	Положение запятой
"0,2", "2", "20", "200", "2000"	,0000 0,000 00,00 000,0 0000

Диапазон измерения напряжения постоянного тока $1 \cdot 10^{-3} \dots 1000$ В разбит на поддиапазоны "0,2"; "2"; "20"; "200"; "2000". Пределы относительной погрешности измерения напряжения постоянного тока в процентах равны: основной $\Delta U = \pm(1 + 0,15 \frac{R_k}{R_u} - 1)$, где U_k – конечное значение предела измерения, В U_x – показания осциллографа-мультиметра, В. В интервале влияющей величины $\Delta U = \pm[2 + 0,25(\frac{U_k}{U_L} - 1)]$, время одного измерения не превышает 1,5 с. Диапазон измерения напряжения переменного тока $1 \cdot 10^{-3} \dots 300$ В, разбит на поддиапазоны "0,2"; "2"; "20"; "200"; "2000". Диапазон измерения активного сопротивления $1 \cdot 10^{-3} \dots 1999$ Ом разбит на поддиапазоны "0,2"; "2"; "20"; "200"; "2000". Входное активное сопротивление осциллографа-мультиметра при измерении напряжения постоянного и переменного тока не менее 10 МОм. Входная емкость – не более 100 пФ. Мощность, выделяемая на измеряемом сопротивлении – не более 1 мВт. Осциллограф универсальный С1-68 - предназначен для наблюдения и исследования формы электрических процессов путем визуального наблюдения и измерения их временных и амплитудных значений. По точности воспроизведения сигнала, измерения временных и амплитудных значений прибор относится ко 2—3 классам точности. Условия эксплуатации: рабочая температура окружающего воздуха от минус 10° до плюс 50 °С; предельная температура от минус 50 °С до +60 °С; относительная влажность воздуха до 95 % при температуре до плюс 30 °С. Прибор нормально работает после воздействия (в укладочном ящике) ударных нагрузок: многократного действия с ускорением до 15g длительностью импульса от 5 до 10 мс; одиночного действия с ускорением до 75g длительностью импульса от 1 до 10 мс. Прибор устойчив к циклическому изменению температуры окружающего воздуха от предельной положительной до предельной отрицательной. Прибор выпускается в двух вариантах исполнения: настольном И22.044.053; стойном И22.044.054. Технические данные. Осциллограф С1-68 обеспечивает:

а) наблюдение формы импульсов обеих полярностей длительностью от 2 мкс до 16 с амплитудой от 1 мВ до 300 В;

б) наблюдение периодических сигналов в диапазоне частот от 0,06 Гц до 1 МГц;

в) измерение амплитуд исследуемых сигналов в диапазоне от 2 мВ до 300 В, а с выносным делителем 1:10 - от 20 мВ до 350 В;

г) измерение временных интервалов — от 2 мкс до 16 с.

Коэффициенты отклонения (положение переключателя «V/cm, mV/cm») устанавливаются:

а) скачкообразно от 1 мВ/см до 5 В/см с возможностью умножения (уменьшения чувствительности) на 10; плавное перекрытие каждого поддиапазона не менее 2,5 раза;

б) основная погрешность измерения напряжения в диапазоне от 2 мВ до 300 мВ при размере изображения от 2 до 6 делений не превышает: $\pm 5\%$ — при коэффициентах отклонения от 2 мВ/см до 50 В/см; $\pm 8\%$ — при коэффициенте отклонения 1 мВ/см «x1» или «x10» коэффициент отклонения канала горизонтального отклонения не более 1 В/см. Время нарастания переходной характеристики канала вертикального отклонения луча не более 0,35 мкс; с выносным делителем 1:10 — 0,45 мкс. Время установления переходной характеристики канала вертикального отклонения луча не более 1,1 мкс; с выносным делителем 1:10 — 1,8 мкс. Выброс переходной характеристики канала вертикального отклонения не более 5%; с выносным делителем 1:10 — не более 8%. Спад вершины переходной характеристики при закрытом входе не более 10% при длительности 10 мс. Неравномерность переходной характеристики не более 3%; с выносным делителем 1:10 — не более 10%. Параметры входов:

а) канала вертикального отклонения — входное активное сопротивление $(1 \pm 0,02)$ МОм, входная емкость (50 ± 5) пФ; с выносным делителем 1:10—входное сопротивление (10 ± 1) МОм, входная емкость не более 13 пФ, погрешность коэффициента деления не более $\pm 10\%$;

б) канала горизонтального отклонения — входное активное сопротивление не менее 50 кОм, входная емкость не более 30 пФ;

в) входа внешней синхронизации — входное активное сопротивление не менее 50 кОм в положении переключателя синхронизации «Внеш. 1:1» и не менее 500 кОм в положении «Внеш. 1:10», входная емкость не более 50 пФ;

г) канал «Z» — входное сопротивление $(1 \pm 0,2)$ МОм, входная емкость не более 35 пФ. Допускаемое суммарное значение постоянного и переменного напряжений в закрытом входе не более 350 В.

Максимальный измеряемый размах исследуемого сигнала не более 300 В.

Максимальный размах исследуемого сигнала, подаваемого на вход прибора через выносной делитель 1:10, не более 350 В. Пределы перемещения луча по вертикали не менее двух значений номинального вертикального отклонения.

Пределы перемещения луча по горизонтали обеспечивают совмещение начала и конца рабочей части развертки с центром экрана. Генератор развертки может работать в периодическом или ждущем режиме и имеет следующие параметры:

а) диапазон длительностей развертки (калиброванных коэффициентов развертки) от 2 с/см до 2 мкс/см разбит на 19 фиксированных поддиапазонов. Предусмотрена возможность пятикратной растяжки развертки (пятикратного

уменьшения коэффициента развертки в положении «0,2»). Плавное перекрытие каждого поддиапазона не менее 2,5 раза;

б) основная погрешность измерения временных интервалов в диапазоне от 2 мкс до 16 с при измеряемом размере изображения по горизонтали от 4 до 8 делений рабочей части развертки не более $\pm 5\%$ без растяжки и $\pm 8\%$ — с использованием растяжки. Внутренняя синхронизация развертки осуществляется сигналом любой полярности при минимальном уровне изображения не более 3 мм и максимальном уровне — 60 мм в диапазоне частот от 1 Гц до 1 МГц и импульсными сигналами длительностью от 1,4 мкс и более. Внешняя синхронизация развертки осуществляется сигналом в диапазоне частот от 1 Гц до 1 МГц при амплитуде сигнала от 0,5 до 50 В, а также импульсными сигналами с длительностью от 1,4 мкс и более при амплитудах от 0,5 до 50 В.

Нестабильность синхронизации развертки (размытость изображения) не превышает ширины линии луча.

Синхронизация от сети — частотой 50, 400 Гц, минимальный уровень изображения — не более 3 мм, максимальный уровень — не менее 60 мм. Амплитуда напряжения развертки для запуска внешних устройств, выведенного на гнездо « ^ » в пределах от 5 до 12 В на нагрузку сопротивлением не менее 20 кОм и емкостью не более 100 пФ. Размеры рабочей части экрана по вертикали не менее 60 мм (6 делений) и по горизонтали не менее 80 мм (8 делений). Ширина линии луча не более 0,7 мм, а при коэффициенте отклонения по вертикали 1 мВ/см — не более 1 мм. Минимальная частота следования развертки, при которой обеспечивается наблюдение исследуемого сигнала на наиболее быстрой развертке, не более 250 Гц. Нелинейность отклонения не превышает 5 %. Полоса пропускания канала горизонтального отклонения от 0 до 500 кГц. Опорная частота 1 кГц. Параметры, определяющие нестабильность положения луча: долговременный дрейф нулевой линии в течение 1 ч работы после 15 мин. прогрева не превышает 3,5 мВ (35 мм); кратковременный дрейф за 1 мин в течение 1 ч не превышает 0,3 мВ (3 мм); смещение луча при изменении напряжения питания на $\pm 10\%$ не более 0,3 мВ (3 мм). Периодические (от внутреннего преобразователя напряжения или случайные шумы) отклонения луча не превышают 2 %. Задержка начала развертки относительно сигнала синхронизации не более 0,3 мкс. Нелинейность развертки в пределах рабочей части развертки не превышает 5 %. При растяжке длительности развертки «хО,2» нелинейность не превышает 10 %.

Параметры, зависящие от электронно-лучевой трубки:

а) геометрические искажения не более 3 %;

б) погрешность ортогональности не более 2°;

в) яркость луча осциллографа регулируется от полного отсутствия до величины, удобной для наблюдения.

Модуляция яркости обеспечивается при подаче на гнездо «-£) Z» сигнала с амплитудой от 20 до 50 В в диапазоне частот от 20 Гц до 200 кГц. Яркость подсвета шкалы регулируется от полного отсутствия до величины,

удобной для наблюдения. В приборе обеспечивается возможность подачи исследуемых сигналов в полосе частот от 20 Гц до 10 МГц непосредственно на открытый симметричный вход отклоняющих пластин электронно-лучевой трубки через внешний переходной конденсатор емкостью не менее 0,1 мкФ. Параметры входов «Пластины Y» и «Пластины X» входное сопротивление относительно корпуса — $(1 \pm 0,2)$ МОм при входной емкости не более 20 пФ. Чувствительность входа «Пластины Y» не менее 1,0 мм/В «Пластины X» — не менее 0,6 мм/В (определяется техническими условиями на ЭЛТ). Внутренний источник калиброванного напряжения генерирует П-образные импульсы с частотой 2 кГц (период 0,5 мс) и амплитудой 0,1 и 1 В: а) основная погрешность напряжения и частоты не превышает $\pm 1,5 \%$;

б) асимметрия импульсов не превышает 20 %. Питание прибора осуществляется: - от сети переменного тока напряжением (220 ± 22) В частотой $(50 \pm 0,5)$ Гц, напряжением $(115 \pm 5,75)$ В и (220 ± 11) В частотой (400 ± 12) Гц и содержанием гармоник до 5 %. - от источника постоянного тока напряжением $(12,6 \pm 1,26)$ В и $(24 \pm 2,4)$ В. Мощность, потребляемая от сети при номинальном напряжении, не превышает 40 ВА. Величина тока, потребляемого прибором от источника постоянного тока напряжением 12,6 В, не превышает 1,8 А. Время установления рабочего режима прибора не превышает 15 мин. Прибор допускает непрерывную работу в течение 16 часов. Нарботка приборов на отказ не менее 1500 ч. Средний срок службы прибора 10 лет. Средний ресурс 5000 ч. Масса прибора не более: для настольного исполнения — 10 кг; для стоечного исполнения — 14 кг. Масса прибора с транспортной тарой не более: для настольного исполнения — 45 кг; для стоечного исполнения — 46 кг. Габаритные размеры прибора: для настольного исполнения — 274X182X440 мм. для стоечного исполнения — 520X160X510 мм



Рисунок 15.4 - Некоторые виды осциллографов

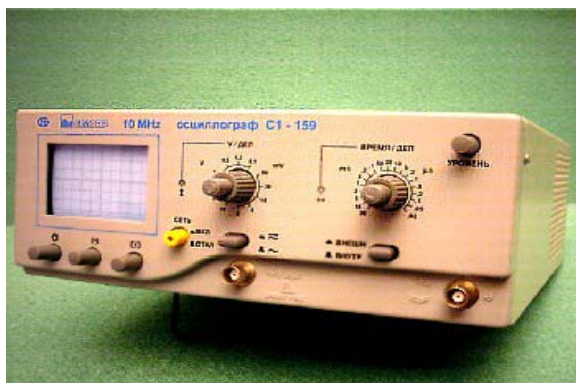


Рисунок 15.4, лист 2



Рисунок 15.4, лист 3

Необходимо также остановиться на цифровых СИ. В общем, такие приборы имеют название как (ЦИП) цифровые измерительные приборы или преобразователи. В отличие от аналоговых СИ в ЦИП обязательно выполняются следующие операции:

- квантование измеряемой величины по уровню;
- дискретизация ее по времени;
- кодирование информации.

ЦИП называют такие СИ, в которых автоматически вырабатываются дискретные сигналы измерительной информации, соответствующую по уровню, которая регистрируется показаниями в цифровой форме на цифровом табло. В современных ЦИП присутствует некоторый преобразователь из двоичной системы счисления в десятичную, они сильно упрощаются при применении кодирования двоично-десятичной системы счисления. Принцип работы ЦИП показан на рисунке 15.5, где можно рассмотреть дискретизацию и квантование непрерывной величины, изменяющейся от времени.

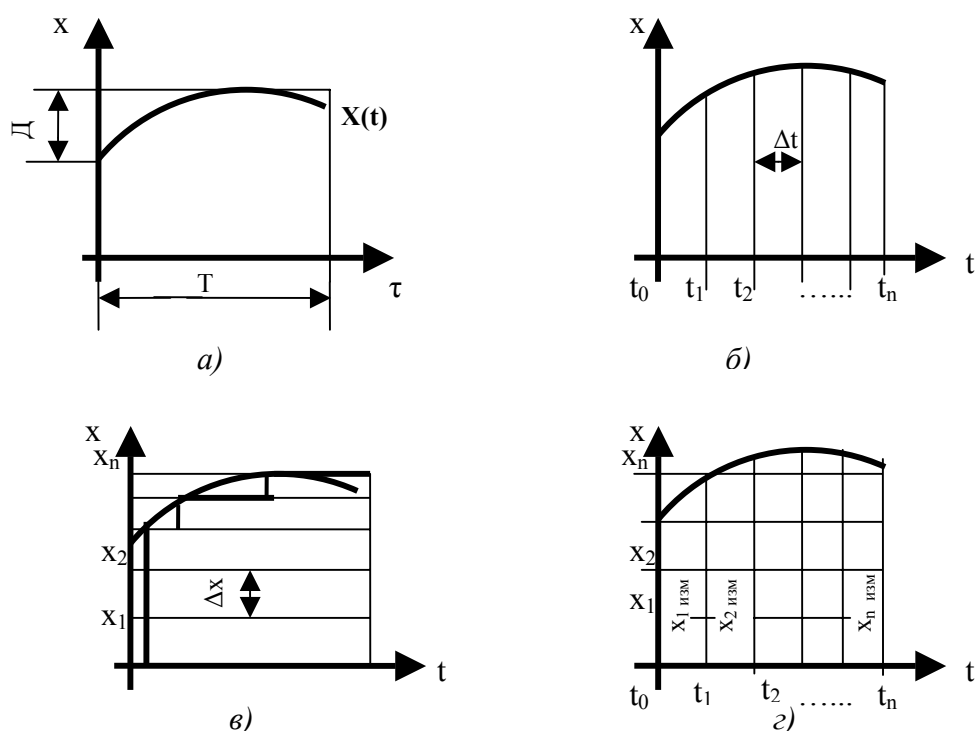


Рисунок 15.5 Принцип работы цифрового измерительного прибора

Принцип работы ЦИП основан на дискретном представлении непрерывных величин. Непрерывная величина $x(t)$ – величина, которая может иметь в заданном диапазоне D бесконечно большое число значений в интервале времени T при бесконечно большом числе моментов времени (рисунок 15.5 а). Величина может быть непрерывной либо по значению, либо по времени. Величину, непрерывную по значению и прерывную по времени, называют дискретизированной (рисунок 15.5 б). Значения дискретизированной величины отличны от нуля только в определенные моменты времени. Величину, непрерывную по времени и прерывную по значению, называют квантованной (рисунок 15.5 в). Квантованная величина в диапазоне D может принимать только конечное число значений. Непрерывная величина $x(t)$ может быть дискретизированной и квантованной одновременно (рисунок 15.5 г). Процесс преобразования непрерывной во времени величины в дискретизированную путем сохранения ее мгновенных значений в моменты времени $t_0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$

(моменты дискретизации) называют дискретизацией. Интервал Δt между ближайшими моментами дискретизации называют шагом дискретизации. Процесс преобразования непрерывной по значению величины в квантованную путем замены ее значений ближайшими фиксированными значениями $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ называется квантованием. Разность Δx между двумя определенными (детерминированными) значениями величин называют шагом квантования. При измерении отсчет значения величины $x(t)$ производится в моменты дискретизации с точностью до ближайшего квантованного значения. Поэтому в общем случае полученное в результате квантования значение $X_{\text{изм.}}$ отличается от действительного значения измеряемой величины $X_{\text{д}}$. Следовательно, погрешность от замены $X_{\text{д}}$ на $X_{\text{квант.}}$ Может быть снижена за счет уменьшения шага квантования, что и является главным преимуществом ЦИП, так как, если шаг квантования стремится к нулю, то и погрешность может быть снижена значительно. Процесс измерения в ЦИП включает в себя дискретизацию, квантование и кодирование – получение по определенной системе правил числового значения квантованной величины в виде комбинации цифр (дискретных сигналов). Так, например, кодирование квантованных значений сигналов $X_{0 \text{ изм.}}, X_{1 \text{ изм.}}, X_{2 \text{ изм.}}, \dots, X_{n \text{ изм.}}$ (рисунок 16.1.4г) может быть осуществлено путем выработки в приборе в моменты дискретизации $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ пакетов импульсов, с числом импульсов, равным количеству интервалов квантования. Процесс аналого-цифрового преобразования составляет сущность любого ЦИП, более подробно с такими приборами и СИ можно познакомиться в источниках [8, 10, 11, 12, 14].

Наиболее популярным ЦИП можно привести прибор, зарегистрированный в Государственном реестре СИ под № 17977 – 98 с названием «регулятор микропроцессорный многоканальный серии МЕТАКОН – 512/522/532/562».

За последние годы номенклатура таких СИ и предприятий, их выпускающих, резко возрастает, поэтому привести перечень всех, подобно вышеуказанному измерительному прибору, СИ не представляется возможным.

16 Измерительные преобразователи неэлектрических величин

16.1 Параметрические измерительные преобразователи неэлектрических величин

Измерительные преобразователи неэлектрических величин делятся на параметрические и генераторные. В параметрических преобразователях выходной величиной является приращение параметра электрической цепи (R , L , M , C), поэтому при их использовании необходим дополнительный источник питания.

В генераторных преобразователях выходной величиной являются ЭДС, ток или заряд которых функционально связаны с измеряемой неэлектрической величиной.

При создании измерительных преобразователей неэлектрических величин стремятся получить линейную функцию преобразования. Отличие реальной градуировочной характеристики от номинальной линейной функции преобразования обуславливает погрешность нелинейности, являющуюся одной из главных составляющих результирующей погрешности при измерениях неэлектрических величин. Одним из способов снижения погрешности нелинейности является выбор в качестве входных и выходных величин преобразователя таких величин, взаимосвязь которых ближе к линейной функции. Так, например, при измерении линейных перемещений с помощью емкостного преобразователя может изменяться либо зазор между пластинами, либо площадь их перекрытия. При этом функции преобразования оказываются различными. При изменении зазора зависимость емкости от перемещения подвижной пластины существенно нелинейная, она описывается гиперболической функцией. Однако, если в качестве выходной величины преобразователя использовать не его емкость, а сопротивление на некоторой частоте, то измеряемое перемещение и указанное емкостное сопротивление оказываются связанными линейной зависимостью.

Другим эффективным способом уменьшения погрешности нелинейности параметрических измерительных преобразователей является их дифференциальное построение. Любой дифференциальный измерительный преобразователь фактически представляет собой два аналогичных измерительных преобразователя, выходные величины которых вычитаются, а входная величина воздействует на эти преобразователи противоположным образом.

Структурная схема прибора с дифференциальным измерительным преобразователем приведена на рисунке 16.1.

Измеряемая величина x воздействует на два аналогичных измерительных преобразователя $ИП1$ и $ИП2$, причем соответствующие приращения значений выходных величин y_1 и y_2 имеют противоположные знаки. Кроме того, есть некоторое постоянное начальное значение x_0 величины

на входах этих преобразователей, определяемое обычно конструктивными параметрами преобразователей. Выходные величины y_1 и y_2 вычитаются, а их разность y_3 измеряется электроизмерительным устройством ЭИУ (аналоговым или цифровым).

Предположим, что преобразователи *ИП1* и *ИП2* идентичны, а их функции преобразования достаточно точно описываются алгебраическим полиномом второго порядка. В этом случае значения y_1 и y_2 на выходах преобразователей можно записать виде (16.1) /14/

испытания продукции, которая прошла этап конструкторской или рецептурной разработки непосредственно перед решением о постановке ее на производство – квалификационные испытания качества разработки и на испытания продукции, которая прошла этап технологической разработки, т.е. разработка технологических процессов, технологического оборудования, оснастки, инструмента, технологических линий, обучение и подготовка кадров – квалификационные испытания готовности производства к выпуску качественной продукции. Определения этих видов испытаний можно найти в ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения».

Целью испытаний следует считать нахождение истинного значения параметра (характеристики), определенного не при тех реальных условиях, в которых он фактически может находиться в ходе испытаний, а в заданных номинальных условиях испытания. Реальные условия испытаний практически всегда отличаются от номинальных, поскольку установить параметры условий испытаний абсолютно точно невозможно. Следовательно, результат испытания всегда имеет погрешность, возникающую не только из-за погрешности определения искомой характеристики, но и из-за неточного установления номинальных условий испытания.

Результатом испытаний называется оценка характеристик свойств объекта, установления соответствия объекта заданным требованиям, данные анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний. Результат испытаний характеризуется **точностью** — свойством испытаний, описывающим близость их результатов к действительным значениям характеристик объекта в определенных условиях испытаний.

Между измерением и испытанием существует большое сходство: во-первых, результаты обеих операций выражаются в виде чисел; во-вторых, погрешности и в том, и другом случае могут быть выражены как разности между результатами измерений (испытаний) и истинными значениями измеряемой величины (или определяемой характеристики при номинальных условиях эксплуатации). Однако с точки зрения метрологии между этими операциями имеется значительная разница: погрешность измерения является только одной из составляющих погрешности испытания. Поэтому можно сказать, что испытание — это общая операция, чем измерение. Измерение можно считать частным случаем испытания, при котором условия испытаний не представляют интереса. Кроме того, параметры испытаний назначаются,

исходя из требований превзойти параметры образцов – аналогов, так, чтобы опытные образцы испытаний получили эксплуатационные свойства лучше международных аналогов этой же продукции, такие параметры называют номинальными – X_N .

$$\begin{aligned} y_1 &= a_0 + a_1 \cdot (x_0 + x) + a_2 \cdot (x_0 + x)^2 \\ y_2 &= a_0 + a_1 \cdot (x_0 - x) + a_2 \cdot (x_0 - x)^2, \end{aligned} \quad (16.1)$$

После вычитания получим (16.2) /14/

$$y_3 = y_1 - y_2 = 2(a_1 + 2a_2x_0) \cdot x, \quad (16.2)$$

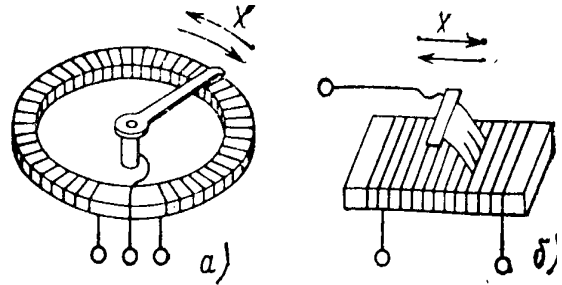
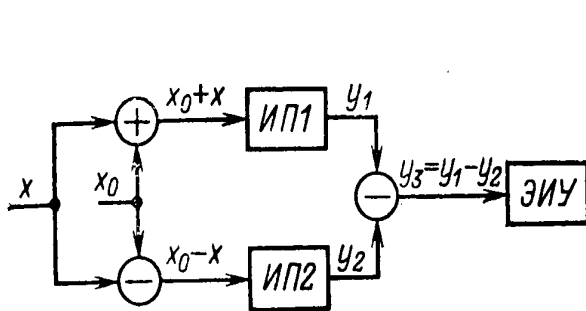


Рисунок 16.1 - Структурная схема дифференциального измерительного преобразователя

Рисунок 16.2 - Реостатные измерительные преобразователи

Отсюда видно, что результирующая функция преобразования $y_3 = f(x)$ оказалась линейной. Так как y_3 не зависит от a_0 , то происходит компенсация систематических аддитивных погрешностей измерительных преобразователей. Кроме того, по сравнению с одним преобразователем практически вдвое возрастает чувствительность. Все это определяет широкое применение дифференциальных измерительных преобразователей в практике.

Рассмотрим кратко основные типы используемых параметрических преобразователей неэлектрических величин.

16.1.1 Реостатные преобразователи

Параметрические преобразователи, выходной величиной которых является электрическое сопротивление, называются резистивными. В том случае, когда входной величиной является перемещение, используют реостатные преобразователи, в которых движок реостата перемещается в соответствии со значением измеряемой величины. На рисунке 16.2 схематически показаны конструкции реостатных преобразователей угловых (рисунок 16.2 а) и линейных (рисунок 16.2 б) перемещений. Преобразователь состоит из обмотки, намотанной на каркас, и подвижной щетки. Форма каркаса зависит от характера преобразуемого перемещения (линейное, угловое) и от вида необходимой функции преобразования (линейная, нелинейная). Используют каркасы в виде пластины, цилиндра, кольца и т. д. Они изготавливаются из диэлектрика (гетинакс, керамика) или металла

(дюралюминий с анодированной поверхностью). Проволока для обмотки выполняется из различных сплавов платины, обладающих повышенной коррозионной стойкостью и износоустойчивостью; применяются также манганин, константан, фехраль. Реостатные преобразователи с проволоочной обмоткой являются ступенчатыми (дискретными) преобразователями, поскольку непрерывному изменению перемещения соответствует дискретное изменение сопротивления. Дискретный характер выходной величины определяет возникновение соответствующей погрешности дискретизации, которая уменьшается с увеличением числа витков обмотки. Поэтому реостатные преобразователи обычно имеют не меньше 100-200 витков обмотки. Указанная погрешность дискретизации отсутствует в реохордных преобразователях, в которых щетка скользит вдоль оси калиброванной проволоки.

16.1.2 Тензочувствительные преобразователи (тензорезисторы)

Другим типом резистивных преобразователей являются широко используемые тензочувствительные преобразователи (тензорезисторы).

В основе работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении сопротивления резисторов, выполненных из проводников или полупроводников, при их механической деформации.

Характеристикой тензоэффекта материала является коэффициент относительной тензочувствительности вычисляемый по формуле (16.3) /14/

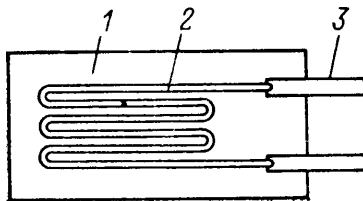


Рисунок 16.3 - Тензочувствительный преобразователь.

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l}, \quad (16.3)$$

где $\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R}$ - относительное изменение сопротивления резистора;

$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$ - относительное изменение линейного размера резистора.

В настоящее время наиболее широко используются наклеиваемые тензопреобразователи (рисунок 16.3). Преобразователь представляет собой тонкую зигзагообразно уложенную и приклеенную к полоске бумаги (подложке 1) проволоку 2 (проволочную решетку). Преобразователь включается в схему с помощью привариваемых или припаиваемых выводов /8/. Преобразователь наклеивается на поверхность исследуемой детали так, чтобы направление ожидаемой деформации совпадало с продольной осью решетки.

Для изготовления преобразователей применяется главным образом проволока диаметром 0,02-0,05 мм из константана, имеющего коэффициент $k=1,9-2,1$.

Применяются также фольговые и пленочные тензорезисторы, габаритные размеры которых меньше габаритных размеров проволочных тензорезисторов.

Изменение температуры вызывает изменение функции преобразования тензорезисторов, что объясняется температурной зависимостью сопротивления преобразователя и различием температурных коэффициентов линейного расширения материала тензорезистора и исследуемой детали. Влияние температуры устраняется обычно путем применения соответствующих методов температурной компенсации. Для измерения выходной величины тензорезисторного преобразователя чаще всего применяют мостовые схемы.

Существенно более высокой тензочувствительностью обладают полупроводниковые тензорезисторы. Так, полупроводниковые тензорезисторы из кристаллов кремния или германия имеют коэффициент тензочувствительности $k = 50 - 200$.

В последние годы появились конструктивно новые полупроводниковые тензорезисторные датчики, в которых полупроводник выращивается непосредственно на упругом элементе из кремния или сапфира. Такие чувствительные элементы обладают хорошими упругими свойствами, в частности малой погрешностью гистерезиса. На одном упругом элементе выращивается обычно не один, а несколько тензорезисторов, образующих измерительную цепь в виде моста (или полумоста). Это обеспечивает малые габаритные размеры преобразователя и лучшую температурную компенсацию. Тензорезисторы всех типов находят широкое применение для измерения деформаций, усилий, давлений, моментов и т. п.

16.1.3 Термопреобразователи сопротивления. Они были подробно рассмотрены в главе 14 – «Измерение тепловых величин», поэтому, считаем повторение излишнее.

16.1.4 Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивных преобразователей основан на зависимости индуктивности или взаимной индуктивности обмоток от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов их магнитной цепи.

Индуктивности и взаимные индуктивности обмоток, расположенных на магнитопроводе, при отсутствии рассеяния магнитного потока определяются формулами (16.4) и (16.5) /14/

$$L_i = \omega_i^2 / Z_m, \quad (16.4)$$

$$M_{ij} = \omega_i \omega_j / Z_m, \quad (16.5)$$

где ω_j и ω_i - число витков i -й и j -й обмоток;

$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}$ - магнитное сопротивление,

$R_m = \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_0 \cdot \mu_k \cdot S_k} + \frac{\delta}{\mu_0 S}$ - активная составляющая магнитного сопротивления,

l_k , S_k , μ_k - соответственно длина, площадь поперечного сечения и относительная магнитная проницаемость k -го участка магнитопровода;

μ_0 - магнитная проницаемость пустоты;

δ - длина воздушного зазора;

S - площадь поперечного сечения воздушного участка магнитопровода;

$X_m = P / \omega \Phi^2$ - реактивная составляющая магнитного сопротивления;

P - потери в магнитопроводе на частоте ω , обусловленные вихревыми токами и гистерезисом;

Φ - магнитный поток в магнитопроводе.

Из приведенных формул следует, что индуктивность и взаимную индуктивность можно изменять, воздействуя на длину или площадь поперечного сечения воздушного участка магнитной цепи, на магнитную проницаемость или на потери в магнитопроводе.

Некоторые типы индуктивных преобразователей схематически показаны на рисунке 16.4.

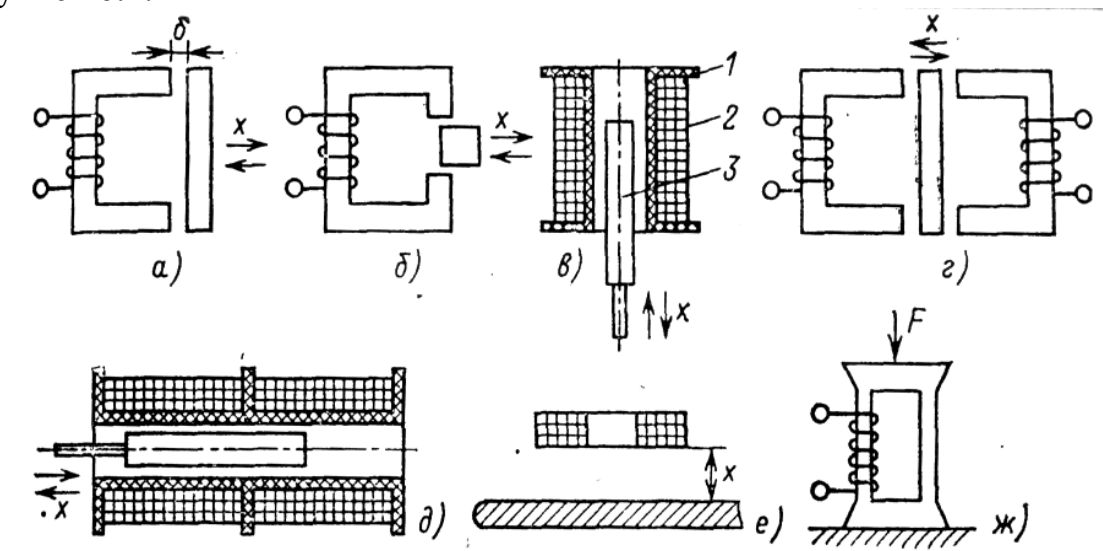


Рисунок 16.4 - Индуктивные преобразователи

Индуктивный преобразователь (рисунок 16.4а) с переменной длиной воздушного зазора б характеризуется нелинейной (близкой к гиперболической) зависимостью $L = f(\delta)$. Рабочее перемещение в таких преобразователях

составляет 0,01-10 мм. Преобразователь с изменяющейся площадью воздушного зазора приведен на рисунке 16.4б. Такие преобразователи позволяют измерять перемещения до 15-20 мм.

На рисунке 16.4 в изображен преобразователь с разомкнутой магнитной цепью. Он представляет собой обмотку 2, намотанную на пластмассовый каркас 1, внутри которого перемещается сердечник 3 из ферромагнитного материала. Перемещение сердечника вызывает изменение индуктивности катушки. Этот тип преобразователя применяется для измерения перемещений от единиц миллиметров до 100 мм.

Широкое распространение на практике получили дифференциальные преобразователи (рисунок 16.4г и 16.4д), в которых перемещение подвижного элемента вызывает увеличение индуктивности одной обмотки и уменьшение индуктивности другой. На рисунке 16.4е иллюстрируется принцип действия токовихревого преобразователя, в котором изменение индуктивности катушки происходит вследствие изменения расстояния от нее до проводящего тела. При питании катушки переменным током в проводящем теле индуцируют вихревые токи, магнитное поле которых оказывает влияние на катушку. Это влияние обычно оценивают значениями вносимых сопротивлений активного и реактивного. При этом эквивалентная индуктивность катушки уменьшается. Токовихревые преобразователи находят широкое, применение в области бесконтактного контроля линейных размеров и толщины покрытий и обнаружения поверхностных дефектов (трещин, царапин).

Принцип действия магнитоупругих преобразователей (рисунок 16.4ж) основан на изменении магнитной проницаемости μ , ферромагнитных тел в зависимости от возникающих в них механических напряжений, обусловленных воздействием механических сил. Изменение магнитной проницаемости $\Delta\mu/\mu$ для различных материалов составляет 0,5-3 % при изменении механического напряжения в материале на 1 МПа.

На рисунке 16.5 приведены некоторые типы трансформаторных (взаимоиндуктивных) преобразователей. На рисунке 16.5а показан трансформаторный преобразователь, в котором изменение воздушного зазора вызывает изменение магнитного сопротивления, взаимной индуктивности обмоток, а следовательно, амплитуды переменного напряжения на выходе.

Преобразователь на рисунке 16.5б отличается тем, что имеет дифференциальную конструкцию, и выходные обмотки дуг включены встречно. При нейтральном (симметричном) положении якоря напряжение на выходе равно нулю. Смещение якоря относительно нейтрального положения приводит к появлению выходного напряжения, причем его фаза при переходе через нейтральное положение меняется на 180° .

Преобразователь с распределенными магнитными параметрами (рисунок 16.5 в) предназначен для измерения больших линейных перемещений и состоит из магнитопровода 4 с рабочей частью в виде двух параллельных полос, обмотки возбуждения 1 и подвижной обмотки 2. При перемещении обмотки 2 от положения 3 до положения 5 напряжение на измерительной

обмотке 2 возрастает, причем его зависимость от перемещения практически линейна, если магнитное сопротивление участка 3-5 магнитопровода мало по сравнению с магнитным сопротивлением зазора.

Преобразователь на рисунке 16.5г отличается от описанного выше тем, что имеет распределенную измерительную обмотку 2, равномерно намотанную на одном из длинных стержней магнитопровода 4, и подвижный ферромагнитный сердечник 3, шунтирующий магнитный поток. Перемещение магнитного шунта вызывает линейно связанное с ним изменение выходного напряжения.

На рисунке 16.5д показан трансформаторный преобразователь больших перемещений с плоскими обмотками. Он состоит из подвижного магнитопровода 1, имеющего центральный стержень и плоский полюсный наконечник.

На центральном стержне размещена обмотка возбуждения 2. В равномерном зазоре магнитопровода находится прямоугольная неподвижная пластина 3 из изоляционного материала, на поверхность которой путем печатного монтажа нанесена плоская измерительная обмотка 4 в виде двух одинаковых плоских треугольных секций с общей вершиной. Секции измерительной обмотки включены между собой встречно. При перемещении подвижного магнитопровода 1 происходит изменение площади измерительной обмотки, пронизываемой магнитным потоком; соответственно изменяется выходное напряжение. Описанные конструкции трансформаторных преобразователей с распределенными параметрами позволяют легко получить необходимую функциональную зависимость выходного напряжения от перемещения. Это достигается путем профилирования плоской измерительной обмотки для преобразователя (рисунок 16.5д) либо путем профилирования верхнего стержня магнитопровода для преобразователя (рисунок 16.5в).

Еще одним типом индуктивных преобразователей являются магнитомодуляционные преобразователи, действие которых основано на изменении магнитного состояния ферромагнитного материала при одновременном намагничивании в постоянном и переменном полях. Модуляция магнитным потоком возможна за счет нелинейных свойств ферромагнитного материала.

Магнитомодуляционные преобразователи применяются для измерения напряженности постоянного магнитного поля (феррозонды) и перемещений. В последнем случае перемещение объекта вызывает изменение положения постоянного магнита, вследствие чего меняются постоянный магнитный поток в магнитопроводе и магнитная проницаемость ферромагнитного материала. Это в свою очередь вызывает изменение магнитного сопротивления переменному магнитному потоку, создаваемому обмоткой, и соответствующее изменение выходной величины преобразователя.

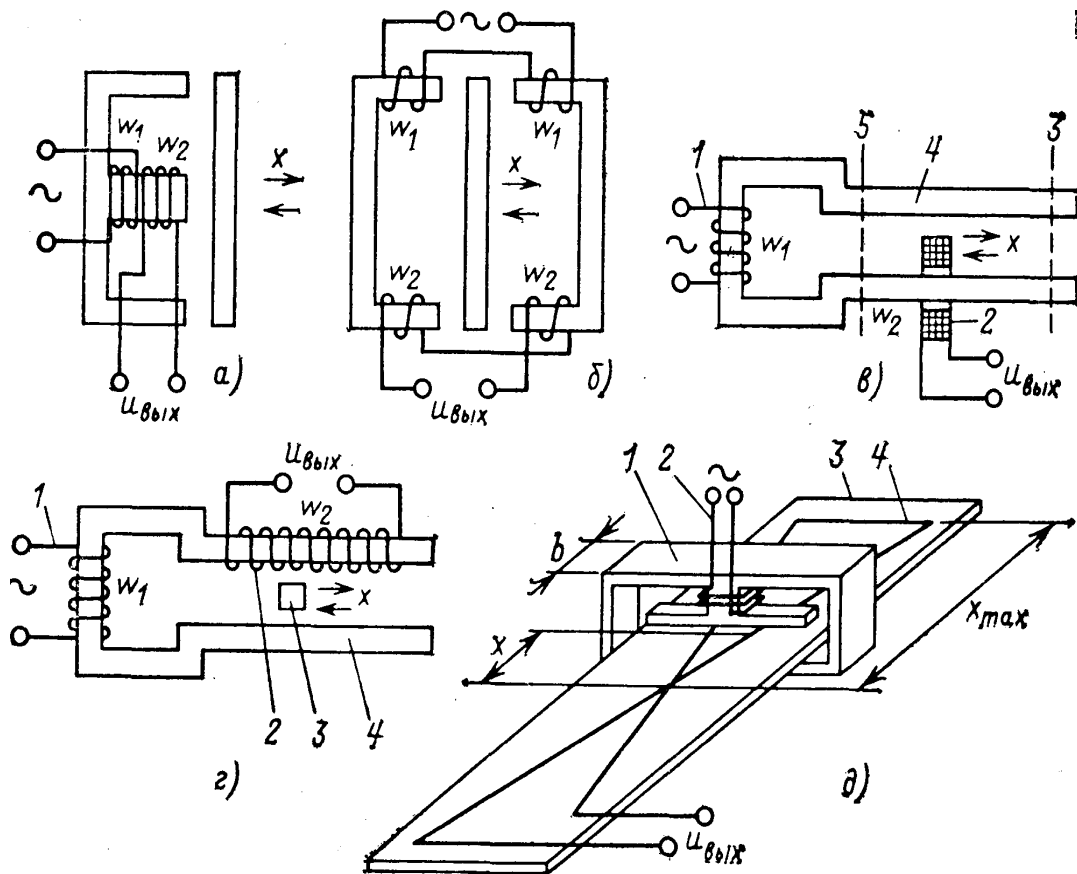


Рисунок 16.5 - Трансформаторные преобразователи

Вопросы проектирования и использования преобразователей перемещения с распределенными параметрами, функциональных и магнитомодуляционных преобразователей подробно рассмотрены в работах Л. Ф. Куликовского и его учеников М. Ф. Зарипова, Н. Е. Конюхова и др.

Индуктивные преобразователи имеют высокую чувствительность значительную мощность выходного сигнала, что определяет их широкое применение на практике.

16.1.5 Емкостные преобразователи

Эти преобразователи основаны на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения обкладок и от диэлектрической проницаемости среды между ними. Электрическая емкость плоского конденсатора вычисляется по формуле (16.6) /14/

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S / \delta, \quad (16.6)$$

где ε_0 - диэлектрическая постоянная;

ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками;

S - активная площадь обкладок;

δ - расстояние между обкладками.

Отсюда следует, что в емкостном преобразователе переменной величиной (входной) может быть либо δ , либо S , либо ε .

На рисунке 16.6 схематически изображены различные типы емкостных преобразователей.

Преобразователь на рисунке 16.6а представляет собой конденсатор, одна пластина которого перемещается относительно другой так, что изменяется расстояние δ между пластинами. Функция преобразования $C = f(\delta)$ нелинейна, причем чувствительность возрастает с уменьшением δ . Минимальное значение δ определяется напряжением пробоя конденсатора. Такие преобразователи используются для измерения малых перемещений (менее 1 мм). На рисунке 16.6б показан дифференциальный емкостный преобразователь, в котором при перемещении центральной пластины емкость одного конденсатора увеличивается, а другого уменьшается. Дифференциальная конструкция позволяет уменьшить погрешность нелинейности или увеличить рабочий диапазон перемещений.

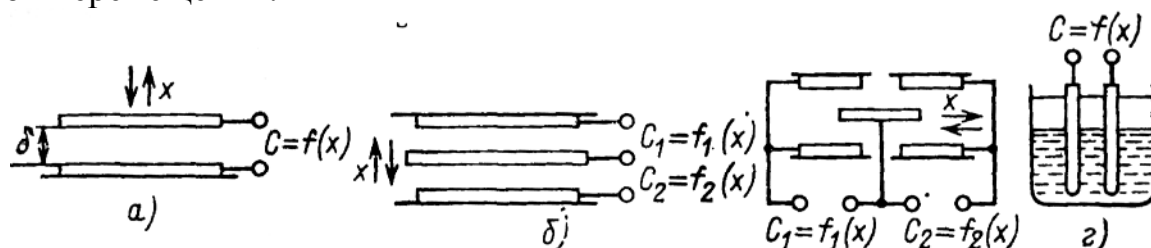


Рисунок 16.6 - Емкостные преобразователи

Преобразователь на рисунке 16.6в также имеет дифференциальную конструкцию, но в нем происходит изменение активной площади пластин. В таком преобразователе можно получить необходимую функцию преобразования путем профилирования пластин.

На рисунке 16.6г изображен емкостный преобразователь для измерения уровня жидкости. Емкость между электродами зависит от уровня жидкости, так как диэлектрическая проницаемость контролируемой жидкости отличается от диэлектрической проницаемости воздуха.

Емкостные преобразователи обычно питаются током повышенной частоты (до десятков мегагерц), что позволяет увеличить мощность выходного сигнала и снизить шунтирующее действие сопротивления изоляции.

Емкостные преобразователи просты по конструкции, имеют высокую чувствительность и относительно малую инерционность. К их недостаткам следует отнести влияние внешних электрических полей, паразитных емкостей, температуры, влажности.

Кондуктометрические преобразователи основаны на использовании зависимости сопротивления электрохимического преобразователя от состава и концентрации электролита. Такие преобразователи используются главным образом для измерения удельной электропроводности электролитов, по которой судят о концентрации. При этом необходимо учитывать, что электропроводность электролита зависит не только от его концентрации, но и от температуры, что требует обязательного введения соответствующей температурной поправки.

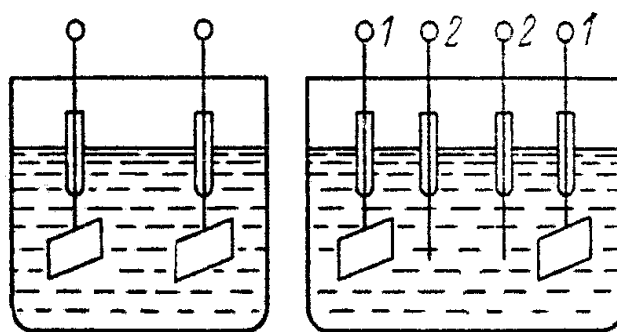


Рисунок 16.7 - Контактный кондуктометрический преобразователь

Кондуктометрические преобразователи для измерения концентрации растворов делятся на контактные и бесконтактные. Простейший контактный кондуктометрический преобразователь (рисунок 16.7 а) содержит два электрода, погруженных в исследуемый электролит. Сопротивление между электродами зависит от концентрации (проводимости) раствора. Электроды могут быть плоскопараллельными, цилиндрическими или точечными и изготавливаются из платины, графита, нержавеющей стали или других материалов, химически стойких к исследуемым растворам.

При прохождении через преобразователь постоянного тока происходит электролиз раствора, что приводит к значительным погрешностям измерений. Поэтому измерение сопротивления между электродами обычно проводят на переменном токе.

Для уменьшения погрешности от поляризации и загрязнения электродов иногда используют четырехэлектродные преобразователи (рисунок 16.7 б). Пара электродов 1-1 (токовые электроды) подключается к внешнему источнику тока. При этом в растворе протекает стабильный ток, а между электродами 2-2 (потенциальными электродами) создается разность потенциалов, пропорциональная удельному сопротивлению раствора. Потенциальные электроды подключаются к усилителю напряжения с достаточно высоким входным сопротивлением. Обычно такой преобразователь также работает на переменном токе.

Бесконтактные кондуктометрические преобразователи не имеют контакта металлических электродов с электролитом, что исключает эффект поляризации, загрязнение электродов и другие отрицательные явления, возникающие при взаимодействии электродов и раствора.

Бесконтактные преобразователи делятся на низкочастотные ($f < 50$ кГц) и высокочастотные. На рисунок 16.8а иллюстрируется принцип действия низкочастотного трансформаторного преобразователя. Исследуемый раствор образует замкнутую вторичную обмотку трансформатора, сопротивление которой определяется концентрацией раствора. Изменение концентрации вызывает изменение, сопротивления потерь, вносимого в первичную обмотку w_1 трансформатора. Измерение эквивалентных параметров первичной обмотки позволяет определить концентрацию раствора.

Преобразователь на рисунок 16.8б содержит два трансформатора, причем замкнутый виток исследуемого раствора является вторичной обмоткой первого трансформатора и первичной обмоткой второго. Первичная обмотка w_1 питается от источника переменного напряжения. При этом ток в витке электролита пропорционален его проводимости; соответственно проводимости электролита оказывается пропорциональна и ЭДС $U_{\text{блх}}$ на обмотке w_2 .

Описанные бесконтактные преобразователи характеризуются более высокой стабильностью характеристик и меньшей погрешностью, чем контактные.

Высокочастотные бесконтактные преобразователи делятся на емкостные, которые применяются для измерения концентраций растворов с малой электропроводностью (10^{-6} - 1 См/м), и индуктивные - для растворов с электропроводностью 10^{-2} - 10^2 См/м.

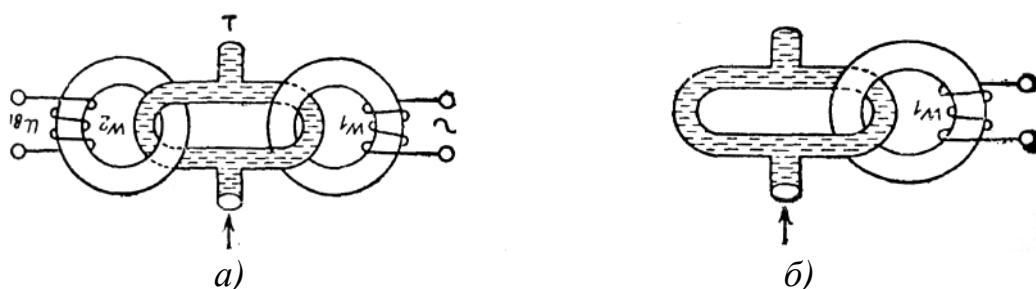


Рисунок 16.8 - Бесконтактные кондуктометрические преобразователи

В преобразователях погружного типа катушка индуктивности или электроды конденсатора помещаются в трубку и изолированы от исследуемого раствора. Влияние проводимости раствора проявляется во внесении потерь в индуктивность или конденсатор, т.е. в изменении активной составляющей их комплексной проводимости на высокой частоте. Такие преобразователи обычно включаются в резонансный контур, у которого меняется добротность, или в контур автогенератора, у которого изменяется частота генерации.

Преобразователи излучений. В преобразователях излучений выходная электрическая величина функционально связана с характеристиками излучения. В зависимости от вида излучения различают оптоэлектрические и ионизационные преобразователи.

Оптоэлектрический преобразователь измеряемой величины x_1 или x_2 в выходную электрическую величину y (рисунок 16.9) содержит источник

излучения *ИИ* потока Φ_1 , некоторый оптический канал *ОК* и прием-пик излучения *ПИ*, воспринимающий поток и преобразующий его в электрическую величину «у».

Воздействие измеряемой величины x на поток излучения Φ_2 может осуществляться двумя путями. В первом случае измеряемая величина x_1 (рисунок 16.9) воздействует непосредственно на источник излучения и изменяет тот или иной параметр излучаемого потока Φ_1 . Во втором случае измеряемая величина x_2 модулирует соответствующий параметр потока Φ_2 в процессе его распространения по оптическому каналу.

В оптоэлектрических преобразователях используется оптическое излучение видимого, инфракрасного или ультрафиолетового диапазона. Источниками излучения могут служить лампы накаливания, газоразрядные лампы, светодиоды и лазеры. В качестве приемников излучения чаще всего применяются фотоэлементы, фотоумножители, фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы. Следует отметить, что фотоэлементы являются генераторными преобразователями, а фотодиоды могут быть генераторными или параметрическими преобразователями.

Оптоэлектрические преобразователи используются для бесконтактных измерений разнообразных физических величин. Чаще всего под действием измеряемой величины изменяется интенсивность излучения, например, вследствие изменения температуры излучателя, изменение поглощения или рассеяния оптического канала, однако могут изменяться также фазовый сдвиг между колебаниями в двух лучах, вызываемый разностью оптического хода этих лучей, частота и длина волны излучения, генерируемого источником. Соответственно структурные схемы оптоэлектрических преобразователей могут быть разделены на три группы: схемы измерения интенсивности излучения, схемы измерения сдвига фаз и углов поворота плоскости колебаний (плоскости поляризации) и схемы измерения частоты и длины волны электромагнитных колебаний оптического диапазона.

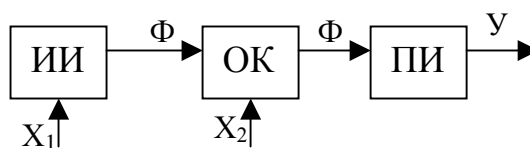


Рисунок - 16.9 Структурная схема оптоэлектрического преобразователя

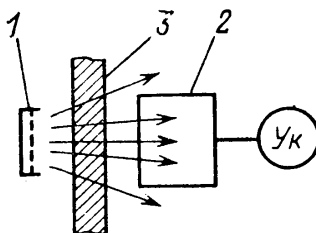


Рисунок – 16.10 Структурная схема прибора для измерения толщины листа

В ионизационных преобразователях используются различные виды ионизирующих излучений: α -, β -, γ - излучение, реже - нейтронное и рентгеновское излучения. Источниками излучений служат естественные и искусственные радиоактивные изотопы и рентгеновские трубки. В качестве приемников излучений применяют ионизационные камеры, газоразрядные счетчики и сцинтилляционные счетчики.

Ионизационные преобразователи служат для измерения интенсивности ионизирующих излучений, геометрических размеров (например, толщины стенки детали), перемещений, концентрации веществ и т. д.

16.2 Генераторные преобразователи неэлектрических величин

Как отмечалось выше, в генераторных преобразователях выходной величиной являются ЭДС, ток или заряд, функционально связанные с измеряемой неэлектрической величиной.

Пьезоэлектрические преобразователи основаны на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, заключающегося в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварца, сегнетовой соли и др.) под влиянием механических напряжений. Это преобразователи генераторного типа, однако, их выходная мощность мала, поэтому к выходу преобразователя должен быть подключен измерительный усилитель с возможно большим входным сопротивлением (10^{11} Ом и более).

В пьезоэлектрических преобразователях применяют главным образом кварц, который обладает высокой механической прочностью и очень слабой зависимостью параметров от температуры.

На рисунке 16.11 схематически изображено устройство пьезоэлектрического преобразователя давления.

Измеряемое давление P действует на мембрану 7, представляющую собой дно корпуса преобразователя. Кварцевые пластины 2 соединены параллельно. Наружные обкладки кварцевых пластин заземляются, а средняя обкладка (латунная фольга 3) изолируется относительно корпуса самим кварцем, имеющим очень высокое удельное сопротивление. Сигнал с кварцевых пластин снимается экранированным кабелем 5. Для удобства соединения вывода от фольги с внутренней жилой кабеля в корпусе преобразователя предусмотрено отверстие, закрываемое пробкой 4.

Электрический заряд Q , возникающий на кварцевых пластинах, пропорционален давлению P , т. е. справедливо равенство (16.7)

$$Q = kF = kPS, \quad (16.7)$$

где k - пьезоэлектрический коэффициент;

F - сила, действующая на пьезоэлектрик;
 S - площадь мембраны.

Эквивалентная схема преобразователя, соединенного кабелем измерительной цепи, представлена на рисунке 16.12, на котором C_0 - емкость между гранями пьезоэлектрика (емкость преобразователя); $C_{вх}$ - емкость кабеля и входная емкость измерительной цепи; R_0 - сопротивление преобразователя с учетом сопротивления изоляции линии относительно земли; $R_{вх}$ - входное сопротивление измерительной цепи.

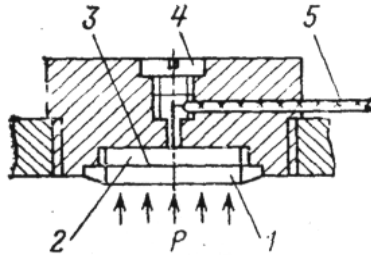


Рисунок 16.11 - Пьезоэлектрический преобразователь

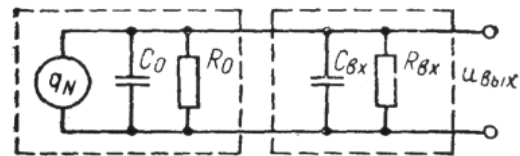


Рисунок 16.12 - Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя

При синусоидальной действующей силе $F = F_m \sin \omega t$ получим равенство (16.8)

$$U_{вых} = k F j \omega R / (1 + j \omega RC), \quad (16.8)$$

где $R = R_0 \cdot R_{вх} / (R_0 + R_{вх})$;
 $C = C_0 + C_{вх}$.

Как видно из (16.8), амплитуда выходного напряжения и сдвиг фаз φ между этим напряжением и измеряемой силой зависят от частоты. Зависимость показана в (16.9)

$$U_{выхм} = k F_b \omega R / \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$

$$\varphi = \pi/2 - \arctg \omega CR, \quad (16.9)$$

Амплитудно-частотная $S (\omega/\omega_0)$ и фазочастотная $\varphi (\omega/\omega_0)$ характеристики преобразователя, включенного в измерительную цепь, представлены на рисунке 16.13. Анализ частотных характеристик показывает, что пьезоэлектрические преобразователи могут быть использованы только для измерений быстро изменяющихся величин (переменных усилий, давлений, параметров вибраций, ускорений и т. д.). Индукционные преобразователи основаны на использовании закона электромагнитной индукции, согласно которому ЭДС, индуцированная в катушке, имеющей ω витков, вычисляется согласно (16.10)

$$e = \omega (d\Phi/dt), \quad (16.10)$$

где Φ - магнитный поток, сцепленный с катушкой.

Индукционные преобразователи применяются для измерений скорости линейных и угловых перемещений. Наибольшее применение они получили в приборах для измерения угловой скорости (тахометрах) и в приборах для измерения параметров вибраций, т. е. для измерения линейных и угловых перемещений и ускорений (в виброметрах и акселерометрах). Очевидно, что для получения перемещений или ускорений необходимо соответственно проинтегрировать или продифференцировать выходной сигнал индукционного преобразователя.

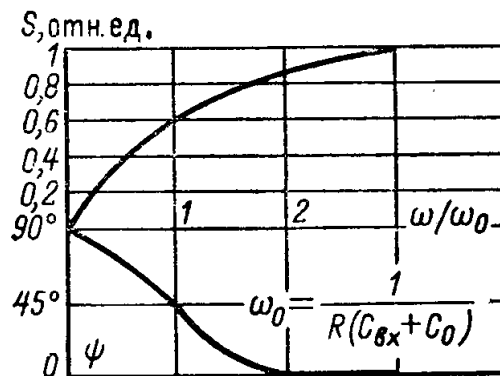


Рисунок 16.13 - Частотные характеристики пьезоэлектрического преобразователя

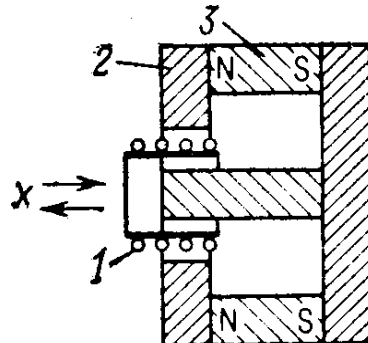


Рисунок 16.14 – Индукционный преобразователь

На рисунке 16.14 схематически показан индукционный преобразователь линейных перемещений. Он представляет собой цилиндрическую катушку, перемещающуюся в кольцевом зазоре магнитопровода 2. Цилиндрический постоянный магнит 3 создает в кольцевом зазоре постоянное радиальное магнитное поле. Катушка при перемещении пересекает силовые линии магнитного поля, и в ней возникает ЭДС, пропорциональная скорости перемещения. Индукционные преобразователи просты по конструкции, надежны в работе, но имеют ограниченный частотный диапазон измеряемых величин.

Термоэлектрические преобразователи (термопары) основаны на термоэлектрическом эффекте, заключающемся в том, что в замкнутом контуре,

состоящем из двух разнородных проводников (или полупроводников), течет ток, если места спаев проводников имеют различные температуры, которые были подробно рассмотрены в разделе 14 «Измерение температуры». Для примера:

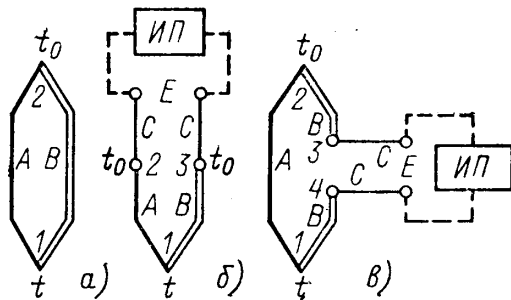


Рисунок 16.15 – Термоэлектрические преобразователи

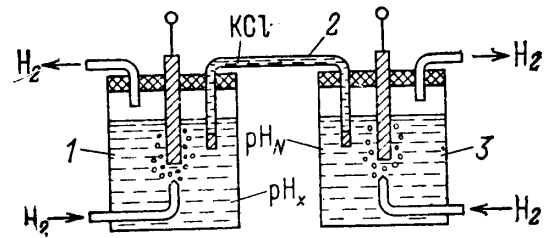


Рисунок 16.16 - Гальванический преобразователь

Для стандартных термопар имеются градуировочные таблицы (ГОСТ 3044-77).

Постоянная времени термоэлектрических преобразователей зависит от их конструкции и качества теплового контакта рабочего спая термопары со средой и для промышленных термопар составляет единицы минут. Однако известны конструкции малоинерционных термопар, у которых постоянная времени лежит в пределах 5-20 с и ниже. Гальванические преобразователи основаны на зависимости ЭДС гальванической цепи от концентрации ионов в электролите и окислительно-восстановительных процессов, происходящих на электродах. Наиболее широко гальванические преобразователи используются в качестве преобразователей рН-метров - приборов для измерения активности (концентрации) водородных ионов. Свойства различных растворов (нейтральных, кислых, щелочных) зависят от концентрации в них водородных ионов. В дистиллированной воде происходит диссоциация части молекул на ионы водорода H^+ и ионы гидроксила OH^- по схеме $H_2O = H^+ + OH^-$.

Это объясняет наличие слабой проводимости у дистиллированной воды. При равновесии процессов диссоциации и восстановления молекул воды из ионов остается постоянным так называемое ионное произведение a_{OH^-} , a_{H^+} , где a_{H^+} и a_{OH^-} соответственно концентрации ионов H^+ и OH^- . Ионное произведение при одинаковой температуре постоянно не только для чистой воды, но и для любых водных растворов кислот, оснований и солей. Установлено, что при 22 °С его значение равно 10^{-14} (моль/л)². В чистой воде или в нейтральном растворе число ионов H^+ и OH^- одинаково, следовательно, $a_{OH^-} = a_{H^+} = 10^{-7}$ моль/л.

Если в воде растворить кислоту, то ионов H^+ станет больше, а ионов OH^- меньше, но ионное произведение не изменится. При растворении в воде щелочи увеличивается концентрация ионов OH^- и соответственно уменьшается концентрация ионов H^+ . Таким образом, концентрация водородных ионов

позволяет характеризовать любые растворы: кислые, нейтральные, щелочные. В качестве численной характеристики используют водородный показатель рН; $pH = -\lg a_{H^+}$.

Диапазон изменения рН водных растворов обычно составляет 0 - 14 ед. Наиболее точный и универсальный метод измерения рН основан на определении потенциалов различных электродов, помещаемых в исследуемый раствор. Следовательно, гальванические преобразователи, являющиеся датчиками рН-метров, в качестве естественной входной величины имеют концентрацию водородных ионов, выражаемую в единицах рН, а в качестве выходной величины - разность потенциалов электродов. Гальванический преобразователь состоит из двух полуэлементов: измерительного электрода, помещенного в исследуемый раствор, и вспомогательного полуэлемента, электродный потенциал которого должен оставаться постоянным.

На рисунке 16.16 показан гальванический преобразователь, состоящий из двух водородных полуэлементов. Водородный электрод можно создать, воспользовавшись свойством водорода адсорбироваться на поверхности платины, иридия или палладия. Обычно водородным электродом служит покрытый платиновой чернью платиновый электрод, к которому непрерывно подводится газообразный водород. Потенциал такого электрода зависит от концентрации водородных ионов в растворе. Один из водородных электродов (измерительный) помещается в исследуемый раствор 1, который при помощи электролитического ключа 2 соединяется с нормальным водородным полуэлементом (вспомогательным) 3, содержащим электролит с активностью водородных ионов $a(H^+) = 1$ моль/л. ЭДС между электродами вычисляется по формуле (16.11) и равна

$$E = (RT/F) \ln(a_{(H^+)_1} / a_{(OH^-)_2}), \quad (16.11)$$

где $R=8,3144$ Дж/(моль·К) - универсальная газовая постоянная;

T - абсолютная температура;

$F=9,6485 \cdot 10^4$ Кл/моль - постоянная Фарадея.

С учетом того, что $\ln a_{(H^+)_1} = -pH$, получим (16.12)

$$E = -2,302 \cdot R \cdot T \cdot pH / F, \quad (16.12)$$

Таким образом, ЭДС между водородными электродами пропорциональна значению рН. Для температуры 18 °С ЭДС равна

$$E = -0,058 pH$$

Водородный электрод обеспечивает наиболее высокую точность измерения рН, однако его недостатком является необходимость непрерывной подачи газообразного водорода. Поэтому в промышленных измерениях в

качестве вспомогательного электрода чаще применяются каломельный и хлорсеребряный полуэлементы, а в качестве измерительного - хингидронный, сурьмяный и (особенно часто) стеклянный.

Измерение ЭДС гальванических преобразователей должно производиться таким образом, чтобы через преобразователь не проходил ток, вызывающий погрешности от поляризации электродов и падения напряжения на внутреннем сопротивлении преобразователя, которое при использовании стеклянных электродов составляет 107-109 Ом. Указанное требование делает необходимым применение электрометрических усилителей или компенсационных измерительных приборов. Следует также учитывать, что измерение рН с помощью гальванических преобразователей требует введения поправки на температуру.

16.2.1 Измерение температуры

Сточки зрения генераторных преобразователей, в современном промышленном производстве, научных исследованиях, при испытаниях материалов и образцов новой техники наиболее распространенными являются измерения температуры, которые рассмотрены в разделе 14 «Измерение температуры».

В качестве примера на рисунке 16.17 изображена структурная схема одного канала измерения температуры информационно-измерительной системы, разработанной в Самарском государственном университете и предназначенной для океанологических исследований. Высокая точность измерений достигается за счет применения платиновых термометров сопротивления и тестового метода автоматической коррекции погрешностей. В данном случае используются функциональные тесты, формируемые по сопротивлению, что позволяет уменьшить погрешности всех звеньев измерительного канала, за исключением первичного преобразователя - термометра сопротивления.

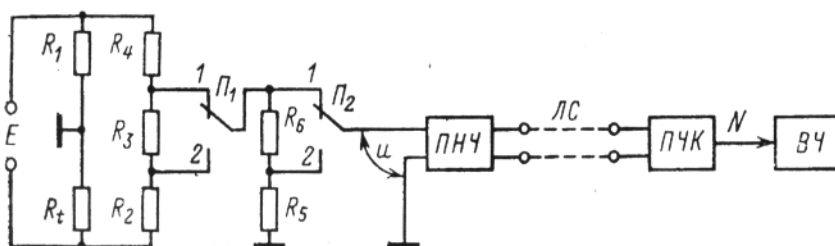


Рисунок 16.17 - Структурная схема канала измерения температуры

Терморезистор R_t включен в схему неуравновешенного моста, образованного резисторами R_1-R_4 , выходное напряжение которого подается на вход преобразователя напряжения в частоту ПНЧ периодического сигнала, передаваемого по проводной линии связи ЛС. На приемной стороне частота сигнала преобразуется в код N преобразователем частоты в код ПЧК, а

полученный код вводится в вычислительное устройство ВУ. Применение ЧМ - сигнала практически исключает влияние параметров линий связи и обеспечивает высокую помехоустойчивость и уменьшение случайных погрешностей при интегрировании сигнала в ПЧК. Предположим, что функция преобразования измерительного канала от напряжения u на входе ПНЧ до кода N на выходе ПЧК достаточно точно описывается кусочно-линейной функцией, каждый участок которой определяется выражением $N = d_{0j} + d_{ij}u$.

Для получения результата измерений выполняются три измерения. В первом измерении переключатели Π_1 и Π_2 находятся в положении 7, во втором измерении Π_1 находится в положении 2, а Π_2 - в положении 1, в третьем измерении Π_1 и Π_2 находятся в положении 2.

Результаты этих измерений можно записать в виде (16.13)

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= d_{0j} + d_{oj}E \frac{R_H}{R_H + R_9} \left(\frac{R_t}{R_t + R_1} - \frac{R_2 + R_3}{R_2 + R_3 + R_4} \right) \\ N_2 &= d_{0j} + d_{oj}E \frac{R_H}{R_H + R_9} \left(\frac{R_t}{R_t + R_1} - \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4} \right) \\ N_3 &= d_{0j} + d_{oj}Ek \frac{R_H}{R_H + R_9} \left(\frac{R_t}{R_t + R_1} - \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (16.13)$$

где $R_H = R_5 + R_6$; $R_9 = R_t \parallel R_1 + (R_2 + R_3) \parallel R_4$, причем $R_2 = R_4$; $k = R_5 / (R_5 + R_6)$

$\parallel$ - знак параллельного соединения соответствующих резисторов.

Входное сопротивление ПНЧ должно быть достаточно велико по сравнению с сопротивлениями резисторов $R_1 - R_6$ и ключей. В этом случае можно использовать электронные ключи, сопротивление R_3 берется того же порядка, что и изменение сопротивления R_t в диапазоне измеряемых температур.

Решив систему уравнений (16.13), получим (16.14)

$$R_t = [(1 - k)R_2 + zR_3] / [(1 - k)(R_2 + R_3) - zR_3], \quad (16.14)$$

где $z = (N_2 - N_3) / (N_2 - N_1)$

Анализ (16.14) показывает, что вычисленные значения R_t не содержат погрешности, вызванные нестабильностью напряжения питания моста, нелинейностью функции преобразования неуравновешенного моста, влиянием нагрузки моста на его коэффициент передачи, а также все относительно медленно меняющиеся погрешности измерительного канала. Очевидно, что точность измерения R_t определяется точностью и стабильностью сопротивлений резисторов $R_1 - R_6$. Значение R_t по (16.14) вычисляется в ВУ, затем по известной функции преобразования термометра сопротивления вычисляется значение измеряемой температуры. При индивидуальной

градуировке платиновых термометров сопротивления описанная ИИС позволяет измерять температуру с погрешностью 0,01-0,02 °С в диапазоне температур от 5 до +40 °С при длине линии связи до нескольких километров. Термоэлектрические преобразователи. При использовании термоэлектрических преобразователей (термопар) возникает необходимость измерения значения термо-ЭДС на выходе термопары. Для этой цели широко применяются милливольтметры и компенсаторы постоянного тока, шкалы которых градуируются непосредственно в градусах температуры.

В данном случае автоматическая коррекция погрешности осуществляется методом вспомогательных измерений, причем термометр сопротивления является вспомогательным измерительным преобразователем, а поправка вводится путем суммирования напряжений. При измерениях температуры широкое применение находят милливольтметры и автоматические электронные показывающие и самопишущие приборы ГСП.

В лабораторных условиях для точного измерения термо-ЭДС применяются лабораторные и образцовые компенсаторы постоянного тока с ручным уравниванием, имеющие более высокие классы точности (до 0,001).

Кварцевые термопреобразователи. В последние годы для измерения температур от -80 до +250°С все более широкое распространение получают кварцевые термопреобразователи, отличающиеся высокой разрешающей способностью и имеющие частотный выходной сигнал, хорошо защищенный от помех и легко преобразуемый в цифровой код. В кварцевом термопреобразователе используется зависимость собственной частоты кварцевого элемента от температуры. В зависимости от ориентации среза относительно осей кристалла кварца изменяются зависимость частоты преобразователя от температуры и линейность функции преобразования. Кварцевые термопреобразователи имеют высокую чувствительность (до 10^3 Гц/К), высокую временную стабильность (0,02 К за год) и разрешающую способность 10^{-4} - 10^{-7} К, что и определяет перспективность их использования в цифровых термометрах, а применение микропроцессоров открывает возможность учета их индивидуальных нелинейных градуировочных характеристик.

Пирометры.

Рассмотренные выше методы измерения температуры относятся к контактному методу. Общим их недостатком является необходимость введения датчика в контролируемую среду, в результате чего происходит искажение исследуемого температурного поля. Кроме того, непосредственное воздействие среды на датчик ухудшает стабильность его характеристик, особенно при высоких и сверхвысоких температурах и агрессивных средах. От этих недостатков свободны бесконтактные методы измерения температуры, основанные на использовании энергии излучения нагретых тел. Тепловое излучение любого тела можно характеризовать количеством энергии, излучаемой телом с единицы поверхности в единицу времени и приходящейся на единицу диапазона длин волн. Такая характеристика представляет собой

спектральную плотность и называется спектральной светимостью или интенсивностью монохроматического излучения. Интеграл от спектральной светимости по всем длинам волн от нуля до бесконечности дает интегральную интенсивность излучения. Законы температурного излучения определены совершенно точно лишь для абсолютно черного тела. Зависимость спектральной светимости R_{λ}^* абсолютно черного тела от температуры и длины волны выражается формулой (16.15)

$$R_{\lambda}^* = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{c_2/(\lambda T)} - 1 \right)^{-1}, \quad (16.15)$$

где λ -длина волны;

T -абсолютная температура;

c_1 и c_2 - постоянные.

В соответствии с (16.15) можно найти интегральную интенсивность излучения абсолютно черного тела, которая для видимой части спектра приближенно равна

$$S^* = \int_0^{\infty} R_{\lambda}^* d\lambda \approx \sigma T^4, \quad (16.16)$$

где σ - постоянный коэффициент.

Интенсивность излучения любого реального тела всегда меньше интенсивности абсолютно черного тела, находящегося при той же температуре. Уменьшение спектральной светимости реального тела по сравнению с абсолютно черным учитывают введением в (16.15) и (16.16) коэффициентов неполноты излучения ε и ε_{λ} , меньших единиц, получаем (16.17)

$$R_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot R_{\lambda}^* \quad S = \varepsilon \cdot S^*, \quad (16.17)$$

Значения ε_{λ} и ε различны для разных физических тел и зависят от состава вещества, состояния поверхности тела и других факторов.

Приборы для измерения температуры, основанные на использовании энергии излучения нагретых тел, называются пирометрами. Пирометры делятся на радиационные, яркостные и цветовые.

Радиационные пирометры используются для измерения температуры от 20 до 2500 °С, причем прибор измеряет интегральную интенсивность S излучения реального объекта. В связи с этим при определении температуры необходимо учитывать реальное значение коэффициента неполноты излучения ε .

На рисунке 16.18а схематически показано устройство такого пирометра.

Внутри телескопа, имеющего объектив 2 и окуляр 5, расположена термобатарея из последовательно включенных термопар 8. Рабочие концы

термопар находятся на платиновом лепестке, покрытом платиновой чернью. Телескоп наводится на объект измерения так, чтобы лепесток полностью перекрывался изображением объекта 1 и вся энергия излучения воспринималась термобатареей. Термо-ЭДС термобатарей является функцией мощности излучения, а следовательно, и температуры тела. Для защиты глаза при наводке телескопа предусмотрен светофильтр 4.

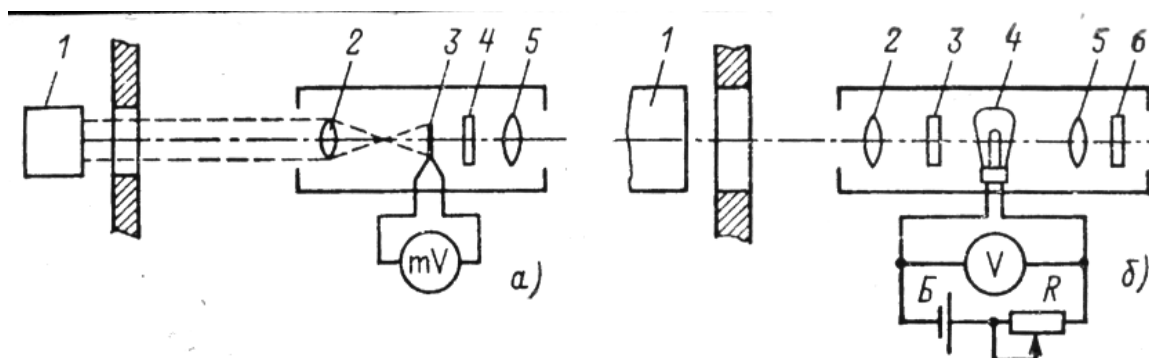


Рисунок 16.18 - Пирометры

Радиационные пирометры градуируются по излучению абсолютно черного тела, поэтому неточность оценки коэффициента неполноты излучения вызывает погрешность измерения температуры. Яркостные (оптические) пирометры основаны на сравнении в узком участке спектра яркости исследуемого объекта с яркостью образцового излучателя. Принцип действия яркости пирометра поясняется на рисунке 16.18б. В этом пирометре яркость исследуемого тела сравнивается с яркостью нити фотометрической лампы 4. Фотометрическая лампа встроена в телескоп, имеющий объектив 2 и окуляр 5. При измерении температуры телескоп направляют на исследуемое тело 1 и добиваются четкого изображения тела и нити фотометрической лампы в одной плоскости. Затем, изменяя яркость нити путем изменения тока через нее (или изменяя яркость изображения тела с помощью перемещаемого оптического клина), добиваются одинаковой яркости изображений нити и исследуемого объекта. Если яркость тела больше яркости нити, то нить видна в виде черной линии на ярком фоне. В противном случае заметно свечение нити на более бледном фоне. При равенстве яркостей нить не видна, поэтому такие пирометры иногда называют пирометрами с исчезающей нитью. Напряжение накала лампы (или положение оптического клина) характеризует температуру нагретого тела. Чтобы интенсивности излучения сравнивались в узком участке спектра, применен светофильтр 6.

Яркостные пирометры обеспечивают более высокую точность измерений температуры, чем радиационные. Их основная погрешность обусловлена неполнотой излучения реальных физических тел и поглощением излучения промежуточной средой, через которую производится наблюдение. Яркостный пирометр типа «Проминь» предназначен для измерения яркостной температуры в пределах 800 - 4000 °С. Диапазоны измерений прибора: 800-1400 °С, 1200-2000 °С и 1800-4000 °С с основной погрешностью измерения соответственно ± 12 , ± 20 и $\pm (50-90)$ °С. Цветовые пирометры основаны на

измерении отношения интенсивностей излучения на двух длинах волн, выбираемых обычно в красной или синей областях спектра.

Для видимой части спектра $e^{c_2/(\lambda T)} \gg 1$.

С учетом этого запишем спектральные светимости реального тела для двух длин волн λ_1 и λ_2 в виде (16.18)

$$\begin{aligned} R_{\lambda_1} &= \varepsilon_{\lambda_1} \cdot c_1 \cdot \lambda_1^{-5} \cdot e^{-c_2/(\lambda_1 T)}, \\ R_{\lambda_2} &= \varepsilon_{\lambda_2} \cdot c_1 \cdot \lambda_2^{-5} \cdot e^{-c_2/(\lambda_2 T)} \end{aligned} \quad (16.18)$$

Формулы (16.18) приближенные, но их погрешность для области видимых лучей и температур до 2600 °С не превышает 1 %.

Отсюда можно выразить искомую температуру в виде формулы (16.19)

$$T = \frac{c_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}{\ln(R_{\lambda_2} \cdot \varepsilon_{\lambda_1} \cdot \lambda_2^5 / R_{\lambda_1} \cdot \varepsilon_{\lambda_2} \cdot \lambda_1^5)}, \quad (16.19)$$

Для вычисления температуры необходима априорная информация о значениях ε_{λ_1} , λ_1 , λ_2 и ε_{λ_2} . В то же время если $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$, то неполнота излучения исследуемого объекта не вызывает погрешности измерения температуры. Это одно из главных преимуществ цветковых пирометров. Кроме того, показания цветковых пирометров принципиально не зависят от расстояния до объекта измерения, а также от поглощения излучения в промежуточной среде, если коэффициенты поглощения одинаковы для обеих длин волн.

Обычно цветовой пирометр содержит один канал измерения интенсивности монохроматического излучения со сменными светофильтрами. Недостатком таких приборов является их относительная сложность. В качестве примера можно привести цветовой пирометр типа «Спектропир-6», работающий в диапазоне температур 900-2200 °С с основной погрешностью ± 1 %.

Новые типы средств измерения температуры.

В последние годы находят практическое применение новые типы средств измерения температуры, основанные на использовании различных физических явлений. К ним относятся шумовые термометры, ядерные квадрупольные и ядерные магнитные резонансные термометры, акустические термометры. Такие термометры используются главным образом при измерениях низких температур.

Для измерений температуры в диапазоне 4-1300 К применяют шумовые термометры, действие которых основано на зависимости шумового напряжения на резисторе от температуры. Эта зависимость определяется формулой Найквиста (16.20)

$$U_{ш}^2 = 4KTR \Delta f, \quad (16.20)$$

где $U_{ш}^2$ - средний квадрат напряжения шума;

K - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура;

R - сопротивление резистора;

Δf - полоса воспринимаемых частот.

Практическая реализация метода заключается в сравнении шумов двух идентичных резисторов, один из которых находится при известной температуре, а другой - при измеряемой. Достоинством шумовых термометров является принципиальная возможность измерения термодинамической температуры на основе физической закономерности (16.20). Однако выходной параметр-среднее квадратическое значение напряжения шумов - очень трудно измерять точно вследствие его малости и сопоставимости с уровнем шума усилителя. Так, при температуре 300 К и сопротивлении 100 Ом при ширине полосы пропускания усилителя 100 кГц измеряемое напряжение составляет $4 \cdot 10^{-7}$ В. Термометры ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) основаны на взаимодействии градиента электрического поля кристаллической решетки и квадрупольного электрического момента ядра, вызванного отклонением распределения заряда ядра от сферической симметрии. Это взаимодействие обуславливает прецессию ядер, частота которой (частота ЯКР) зависит от градиента электрического поля решетки и для различных веществ имеет значения от сотен килогерц до тысяч мегагерц. Градиент электрического поля решетки зависит от температуры, и с повышением температуры частота ЯКР понижается.

Датчик ЯКР - термометра представляет собой ампулу с веществом, помещенную внутрь катушки индуктивности, включенной в контур генератора. При совпадении частоты генератора с частотой ЯКР происходит поглощение энергии от генератора. Погрешность измерения температуры 10 К составляет $\pm 0,02$ К, а температуры 300 К $\pm 0,002$ К. Достоинством ЯКР - термометра является его неограниченная во времени стабильность, а недостатком - нелинейность функции преобразования. Термометры, использующие явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР), менее распространены, чем ЯКР - термометры, но, по-видимому, не менее перспективны, особенно для измерения низких температур. Сообщается о создании прецизионного ЯМР - термометра для измерения температур от 1 мК до 1 К. Амплитуда сигнала ЯМР - термометра и период релаксации обратно пропорциональны абсолютной температуре.

Акустические термометры основаны на зависимости скорости распространения звука в газах от их температуры. Акустический термометр содержит пространственно разнесенные излучатель акустических волн и их приемник, обычно включаемые в цепь автогенератора, частота колебаний которого меняется с изменением температуры. В акустических термометрах могут использоваться различного типа резонаторы. Акустические термометры находят применение в диапазоне средних и высоких температур.

16.2.2 Измерение перемещений

В современном промышленном производстве широко применяются измерения размеров, перемещений и деформаций. Для этой цели используются измерительные преобразователи перемещений, которые по диапазону входных величин делятся на преобразователи малых перемещений (до 2-3 мм для линейных и $2-3^\circ$ для угловых перемещений) и преобразователи больших перемещений (до нескольких метров для линейных и 25-40 оборотов для угловых перемещений). Роль преобразователей перемещений в промышленных измерениях велика также и потому, что при измерениях многих механических величин, таких как сила, давление, момент, сначала осуществляется их преобразование в перемещение, а затем перемещения в электрическую величину.

Для измерений перемещений находят применение различные типы измерительных преобразователей: реостатные, тензочувствительные, индуктивные, емкостные и преобразователи излучений. Выбор типа преобразователя и конкретной его разновидности определяется рядом факторов: диапазоном измеряемых перемещений, необходимой точностью измерений, допустимой продолжительностью измерений, практической возможностью использования контактного датчика той или иной конструкции, требованиями к виброустойчивости, надежности и т. п.

Большинство применяемых на практике преобразователей и приборов для измерения перемещений относится к аналоговым. Однако имеются и цифровые преобразователи - кодирующие линейки и диски. Существуют и специализированные ИИС, в состав которых входят средства измерений перемещений.

Измерение деформаций. При измерениях деформаций в качестве первичных измерительных преобразователей чаще всего используются тензорезисторы. Проволочные, фольговые и пленочные тензорезисторы применяются для измерений относительных деформаций $\varepsilon_l < \text{от } 0,005 \text{ до } 2 \%$. Полупроводниковые тензорезисторы применяются для измерения деформаций до $0,1 \%$. Для измерения больших деформаций ($\varepsilon_l = 5-10 \%$) применяются свободные проволочные тензорезисторы, закрепленные по концам базы.

При измерении тензорезисторы обычно включаются в мостовую измерительную цепь. Напряжение питания моста ограничивается допустимой мощностью, рассеиваемой в тензорезисторе, и лежит в диапазоне 2-12 В. Небольшое рабочее относительное изменение сопротивления тензорезистора определяет и сравнительно небольшое напряжение на выходе моста. Так, выходной сигнал моста с проволочными тензорезисторами составляет не более 10-50 мВ при деформация $\varepsilon_l = 1 \%$. Для повышения чувствительности мостовой измерительной цепи иногда применяют импульсное питание. При сохранении той же мощности, рассеиваемой в тензорезисторе, напряжение питания, а следовательно, и чувствительность моста могут быть увеличены в $\sqrt{Q}$ раз (Q -скважность импульсов).

При измерениях деформаций с помощью тензорезисторов одной из наиболее существенных погрешностей является температурная, для уменьшения которой используют дифференциальное включение тензорезисторов. В этом случае применяют два тензорезистора, наклеиваемых таким образом, чтобы деформация объекта вызывала растяжение одного тензорезистора и сжатие другого.

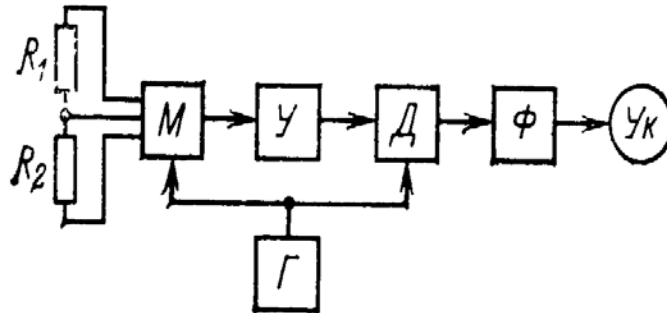
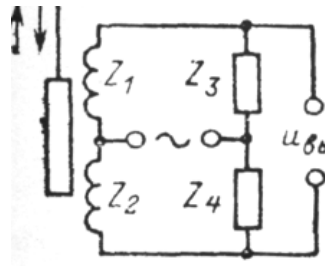


Рисунок 16.19 - Структурная схема измерительного канала тензостанции

Тензорезисторы включаются в два соседних плеча моста. Вследствие того, что изменение температуры вызывает однонаправленные изменения сопротивлений тензорезисторов, температурную погрешность удастся снизить примерно на порядок. Одновременно за счет дифференциальной схемы включения вдвое возрастает чувствительность. Наибольшее распространение получили приборы, в которых тензорезисторы включаются в неуравновешенный мост, питаемый переменным током. Ввиду малости относительных изменений сопротивлений проволочных тензорезисторов нелинейность функции преобразования неуравновешенного моста можно практически не учитывать. Для измерения деформаций широко применяются многоканальные приборы (тензостанции). Структурная схема одного канала тензостанции приведена на рисунке 16.19. Тензорезисторы R_1 и R_2 включены в мостовую измерительную цепь M , питаемую переменным напряжением от генератора G . Выходной сигнал моста усиливается усилителем $У$, а затем демодулируется с помощью синхронного детектора $Д$ и фильтра нижних частот $Ф$. Сигнал с выхода фильтра поступает на указатель $Ук$. Вследствие того, что мостовая измерительная цепь питается переменным током, необходимо учитывать наличие относительно больших паразитных емкостей. Так, если тензорезисторы наклеиваются на металлическую деталь, то емкость между проводящими элементами тензорезистора и деталью может составлять 10-100 пФ. В связи с этим в мосте предусмотрены элементы предварительного уравнивания его не только по активной, но и по реактивной составляющей. Использование частотно-избирательного усилителя и синхронного детектора позволяет повысить помехоустойчивость измерительного устройства. В настоящее время в связи с развитием микроэлектроники все более перспективным становится применение мостовых

цепей с питанием их постоянным током. В качестве источника питания в этих схемах используются стабилизаторы напряжения или тока, а выходное напряжение моста усиливается с помощью усилителя с высоким входным сопротивлением. Получают распространение также измерительные цепи, в которых выходной ток тензомоста уравнивается током дополнительного источника (квазиуравновешенные мосты). Индуктивные датчики находят широкое применение в промышленности для измерений перемещений в диапазоне от десятых долей микрометра до единиц дециметров, а также для измерений других физических величин, преобразуемых в перемещение. Это объясняется существенными достоинствами индуктивных датчиков, такими как простота конструкции, надежность, высокая чувствительность, значительная мощность сигнала на выходе, защищенность от воздействий внешних электрических и магнитных полей. Разнообразие требований и условий эксплуатации датчиков перемещений определяет и множество конкретных конструкций датчиков с изменяющейся индуктивностью или взаимной индуктивностью обмоток. При этом особенно часто используются датчики дифференциального типа. Наиболее распространенной измерительной цепью при использовании дифференциальных индуктивных преобразователей является мостовая цепь, в которой два соседних плеча Z_1 и Z_2 образованы обмотками датчика (рисунок 16.20), а два других - элементами с сопротивлениями Z_3 и Z_4 . На рисунке 16.20 изображен дифференциальный индуктивный датчик с подвижным сердечником. При нейтральном положении сердечника (индуктивности обеих обмоток датчика равны) мост находится в состоянии равновесия, т.е. $U_{вых}=0$. При перемещении сердечника индуктивности обмоток датчика изменяются противоположным образом, что вызывает изменение выходного напряжения. В зависимости от направления движения сердечника от нейтрального положения на 180° меняется фаза выходного переменного напряжения. Если на выходе необходимо получить постоянное напряжение, то сигнал с выхода моста подают на амплитудный детектор. При использовании синхронного, (фазочувствительного) детектора выходное постоянное напряжение меняет знак при переходе подвижного сердечника через нейтральное положение. Вследствие развития микроэлектроники все более перспективным становится преобразование выходного параметра индуктивного датчика в частотно-временные параметры сигналов: частоту, период, длительность импульсов, скважность.

При использовании частотной гармонической модуляции обмотка индуктивного датчика включается в частотно-задающую цепь автогенератора. Недостатком таких схем является нелинейная зависимость частоты генерации от индуктивности обмотки датчика. От этого недостатка свободны схемы, в которых осуществляется импульсная модуляция.

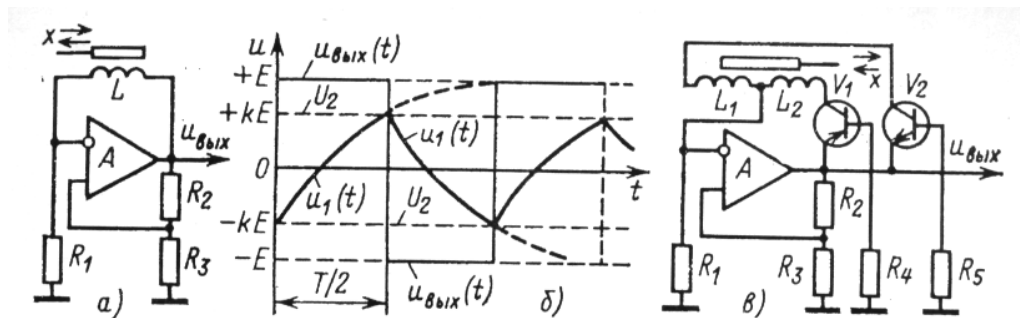


исунок 16.20 - Схема включения дифференциального индуктивного датчика

В качестве примера на рисунке 16.21а приведена упрощенная схема преобразователя индуктивности датчика в период повторения импульсов, реализующая метод развертывающего преобразования. Работа схемы иллюстрируется с помощью временных диаграмм (рисунок 16.21б).

Операционный усилитель А с большим коэффициентом усиления выполняет функции схемы сравнения и находится в состоянии насыщения. Значение напряжения на его выходе $u_{\text{вых}}(t)$ по модулю равно значению напряжения насыщения E и может изменять знак в зависимости от соотношения напряжений на входах усилителя. Напряжение $u_2(t)$ на неинвертирующем входе усилителя снимается с делителя, выполненного на резисторах R_2 , R_3 , а его значение равно $u_2 = kE$, где $k = R_3 / (R_2 + R_3)$. Напряжение $u_1(t)$ на инвертирующем входе усилителя является выходным напряжением пассивной интегрирующей цепочки, образованной катушкой индуктивности L и резистором R_1 . Напряжение $u_1(t)$ изменяется по экспоненте с постоянной времени L/R_1 , стремясь к значению напряжения насыщения E . В момент времени $T/2$, когда $u_1(T/2) = u_2$, схема сравнения переходит в противоположное состояние, т. е. напряжение $u_{\text{вых}}$ меняет знак. Далее процесс циклически повторяется. Выходное напряжение представляет собой периодическую последовательность двухполярных прямоугольных импульсов (типа «меандр»), период повторения которых можно записать в виде равенства (16.21)

$$T = 2 (L/R_1) \ln [(1+k) / (1-k)], \quad (16.21)$$



а - принципиальная электрическая схема; б - временные диаграммы;

в - принципиальная электрическая схема преобразователя с дифференциальным датчиком

Рисунок 16.21 - Преобразователи перемещений в период повторения импульсов.

Отсюда видно, что период повторения импульсов пропорционален индуктивности обмотки датчика перемещений. На рисунке 16.21в показана схема, в которой используется дифференциальный индуктивный датчик перемещений.

Данная схема аналогична описанной выше, но обмотки L_1 и L_2 подключены к выходу операционного усилителя через электронные ключи на транзисторах V_1 и V_2 . Транзисторы имеют различный характер проводимости, поэтому при $u_{\text{вых}} = +E$ транзистор V_1 открыт, а V_2 закрыт, а при $u_{\text{вых}} = -E$ наоборот, V_1 закрыт, а V_2 открыт. Таким образом обеспечивается поочередное подключение обмоток L_1 и L_2 . Если индуктивности этих обмоток не равны, то будут отличаться длительности положительных и отрицательных генерируемых импульсов, т. е. будет изменяться скважность. Выходная величина преобразователя будет вычисляться по формуле (16.22)

$$y = (T_1 - T_2) / (T_1 + T_2) = (L_1 - L_2) / (L_1 + L_2), \quad (16.22)$$

где L_1 и L_2 - длительности положительных и отрицательных импульсов.

Очевидно, что при одинаковой амплитуде положительных и отрицательных импульсов величина y пропорциональна постоянной составляющей выходного сигнала, следовательно, постоянная составляющая выходного сигнала также может рассматриваться в качестве выходной величины. Достоинством датчиков перемещений с частотной гармонической или импульсной модуляцией является возможность передачи выходных сигналов по линиям связи на большие расстояния практически без потерь информации и удобство их преобразования в цифровой код.

При использовании трансформаторных датчиков перемещений выходной величиной является амплитуда переменного напряжения, снимаемого с измерительной обмотки. В дальнейшем это напряжение служит для получения результата измерения либо непосредственно, либо после предварительного преобразования в постоянное напряжение или постоянный ток.

Оптоэлектрические преобразователи. Высокую точность измерений перемещений позволяют получить методы, основанные на применении оптоэлектрических преобразователей и источников оптического излучения, например методы раstra и муара.

В методе раstra используются две плоские пластины с параллельными штрихами. Расстояние между штрихами на каждой пластине постоянно, но для двух пластин незначительно отличается. При наложении пластин (растров) друг на друга и их просвечивании наблюдаются зоны сгущения и разряжения

штрихов (рисунок 16.22а, 16.22б). Перемещение одного раstra относительно другого в направлении, перпендикулярном штрихам, вызывает перемещение указанных зон сгущения штрихов в том же направлении, но значение этого перемещения y оказывается гораздо больше, чем значение измеряемого перемещения x , т. е. происходит оптическая редукция. Если расстояния между штрихами на пластинах равны a и b (рисунок 16.22а, 16.22б), то перемещение y будет вычисляться по формуле (16.23)

$$y = \frac{x}{(1 - b/a)}, \quad (16.23)$$

В методе муара растры на двух пластинах имеют одинаковый шаг, но расположены под небольшим углом α друг к другу (рисунок 16.22б, 16.22г). При наложении растров и их просвечивании наблюдаются светлые и темные полосы, идущие поперек штрихов и называемые комбинационными, или муаровыми, полосами. Перемещение одного из растров вызывает значительно большее смещение муаровых полос в направлении, перпендикулярном направлению движения раstra, т. е. также происходит оптическая редукция. Значения этих перемещений связаны соотношением (16.24)

$$y = x / \sin \alpha, \quad (16.24)$$

Наличие оптической редукции в методах раstra и муара позволяет достигнуть высокой чувствительности к измеряемому перемещению.

При измерениях перемещений от долей микрометра до метра используются лазерные интерферометры. В этих приборах производится сложение двух световых потоков, излучаемых лазером, один из которых проходит постоянный путь, а второй - путь, зависящий от измеряемого расстояния. Сложение потоков приводит к усилению или ослаблению суммарного потока в зависимости от разности фаз потоков, т. е. в зависимости от измеряемого расстояния.

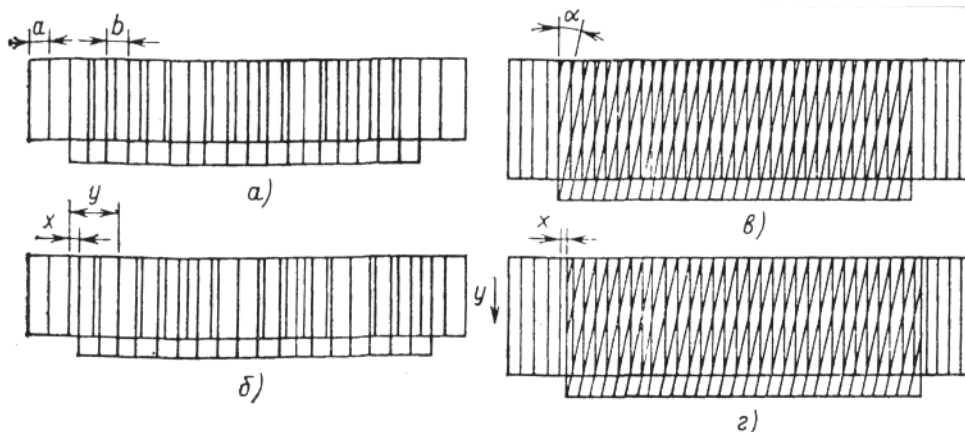


Рисунок 16.22 - Растровый и муаровый преобразователи перемещений

На рисунке 16.23 показано устройство лазерного интерферометра. Лазер излучает световой поток Φ , который разделяется на два потока (Φ_1 и Φ_2) с помощью полупрозрачного наклонного зеркала 2. Поток (Φ_1 , отражаясь от зеркала 2, а затем от зеркала 3, попадает на фотоэлемент 1. Поток Φ_2 проходит через зеркало 2, отражается от объекта 4, затем от зеркала 2 и попадает на фотоэлемент 1. В фотоэлементе 1 потоки складываются, и при изменении расстояния до объекта 4 периодически будет изменяться сигнал (фототок) фотоэлемента. Число подсчитанных с помощью счетчика 5 периодов k фототока и перемещение объекта на расстояние x связаны соотношением (16.25)

$$x = k\lambda/2, \quad (16.25)$$

где λ - длина волны света.

При измерении перемещений до 1 м погрешность составляет 0,1-1 мкм. Для измерения больших расстояний (сотен метров и более) применяются лазерные дальномеры, работающие в импульсном или непрерывном режиме. В первом случае измеряется интервал времени между излученным и отраженным импульсами, во втором - сдвиг фаз между излученным и отраженным сигналами.

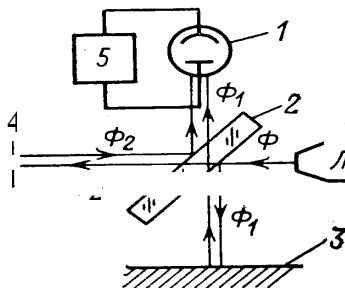


Рисунок 16.23 - Лазерный интерферометр

Измерение уровней.

При учете количества жидких или сыпучих материалов часто возникает необходимость измерения их уровня в резервуарах, причем под уровнем понимается расстояние от верхней поверхности контролируемого вещества до любой произвольно выбранной отметки выше или ниже этой поверхности. Разнообразие конструкций существующих уровнемеров объясняется широким диапазоном размеров резервуаров, различиями в условиях эксплуатации и физико-химических свойств измеряемых веществ. Поэтому рассмотрим лишь некоторые наиболее распространенные способы измерения уровней. При измерениях уровней жидкости широко применяются поплавковые преобразователи, содержащие поплавки, плавающий на поверхности жидкости. Обычно поплавки с помощью штока связан с подвижным элементом

реостатного или индуктивного преобразователя перемещений. Широкое распространение при измерениях уровней получили также емкостные преобразователи, так как в них достигается практически линейное изменение емкости в большом диапазоне изменения уровня жидкости. На рисунке 16.24 приведена схема прибора для измерения уровня с емкостным датчиком. Емкостный датчик опущен в резервуар и состоит из двух цилиндрических электродов. Емкость датчика линейно связана с измеряемым уровнем жидкости x . Емкостный датчик включен в измерительную цепь, представляющую собой уравновешенный мост. Если емкость C_n конденсатора переменной емкости линейно зависит от угла поворота вала реверсивного двигателя $РД$, то этот угол поворота будет линейной функцией измеряемого уровня x . При повороте вала $РД$ одновременно перемещается указатель отчетного устройства OmY . Существенным недостатком данной схемы является зависимость результата измерений от диэлектрической проницаемости среды.

При измерениях уровней как в диэлектрических, так и в проводящих средах находят применение преобразователи, использующие зависимость резонансной частоты длинной линии от степени заполнения ее контролируемой средой (резонансные электромагнитные системы). Обычно такие датчики представляют собой симметричную двухпроводную или коаксиальную линию, включаемую в контур автогенератора. Погружение датчика в контролируемую жидкость вызывает изменение частоты генерации. Действительно, погружение

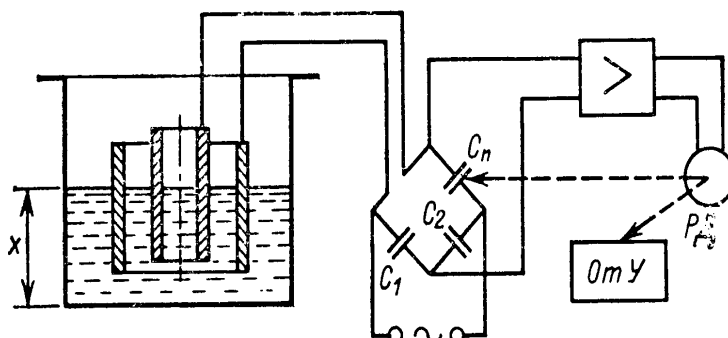


Рисунок 16.24 - Схема прибора для измерения уровня жидкости

датчика в диэлектрическую жидкость с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ приводит к уменьшению его волнового сопротивления, а также к уменьшению фазовой скорости электромагнитных волн в $\sqrt{\epsilon}$ раз. Погружение датчика в проводящую среду приводит к возрастанию резонансной частоты из-за уменьшения участка датчика, по которому протекают высокочастотные токи (проводящая жидкость играет роль замыкающей перемычки). Принцип действия указанных датчиков уровня иллюстрируется на рисунке 16.25 (на рисунке 16.25а - жидкость диэлектрическая, на рисунке 16.25б - жидкость проводящая). К недостаткам резонансных электромагнитных датчиков Уровня следует отнести зависимость их выходной величины от диэлектрической проницаемости жидкости или от удельного сопротивления проводящей жидкости.

Повышение точности измерений перемещений. Широкое применение в промышленности датчиков перемещений для измерений разнообразных физических величин делает очень важной задачу повышения точности измерений перемещений. С одной стороны, указанная задача решается путем совершенствования конструкций и технологии изготовления датчиков перемещений, применения лучших схем преобразования сигналов на базе современной микроэлектроники, а также путем создания новых типов датчиков, использующих различные физические явления.

С другой стороны, для достижения высоких точностей измерений все более перспективным становится использование для повышения точности измерений структурной и временной избыточности.

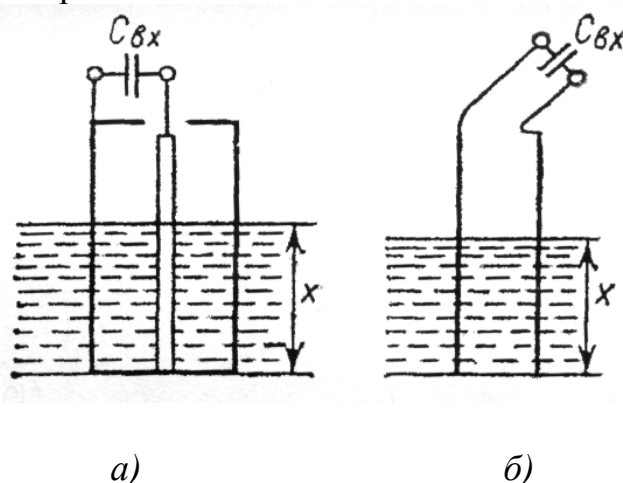


Рисунок 16.25 - Резонансные электромагнитные преобразователи уровня

В качестве примера рассмотрим применение тестовых методов для повышения точности измерений перемещений. На рисунке 16.26 приведена структурная схема одного канала тестовой ИИС с индуктивными датчиками перемещений. Датчик перемещений представляет собой дифференциальный индуктивный датчик соленоидного типа с подвижным ферромагнитным сердечником. Выводы катушек 1-3 и 5-7 образуют основной (исходный) ЭП $V_{вых}$ дифференциальный датчик. Выводы 2-4 и 6-8 смещены относительно выводов основного датчика на одну и ту же величину θ . При однородной по длине датчика намотке выводы 2-4 и 6-8 образуют как бы другой (дополнительный) дифференциальный датчик, смещенный относительно основного на величину θ . Обмотки датчика с помощью коммутатора К подключаются к измерительному преобразователю МП, выходной сигнал которого передается в линию связи ЛС. В качестве ИП может быть использован, например, преобразователь индуктивности в период, изображенный на рисунке 16.26. Аналого-цифровой преобразователь АЦП преобразует сигнал в цифровой код N, который вводится в вычислительное устройство ВУ. Предположим, что функция преобразования перемещения сердечника в индуктивность любой обмотки датчика описывается алгебраическим полиномом второго порядка. Тогда для индуктивностей обмоток, имеющих выводы 1-3, 5-7, 2-4 и 6-8, можно записать выражения (16.26)

$$\begin{aligned}
L_{1-3} &= d_0 + d_1(x_0 + x) + d_2(x_0 + x)^2 \\
L_{5-7} &= d_0 + d_1(x_0 - x) + d_2(x_0 - x)^2 \\
L_{2-4} &= d_0 + d_1(x_0 + x + \theta) + d_2(x_0 + x + \theta)^2, \\
L_{6-8} &= d_0 + d_1(x_0 - x - \theta) + d_2(x_0 - x - \theta)^2
\end{aligned} \tag{16.26}$$

где x_0 - нейтральное положение сердечника, при котором $L_{1-3} = L_{5-7}$;
 x - измеряемое перемещение, отсчитываемое относительно нейтрального положения сердечника;
 d_0, d_1, d_2 - параметры функции преобразования датчика.

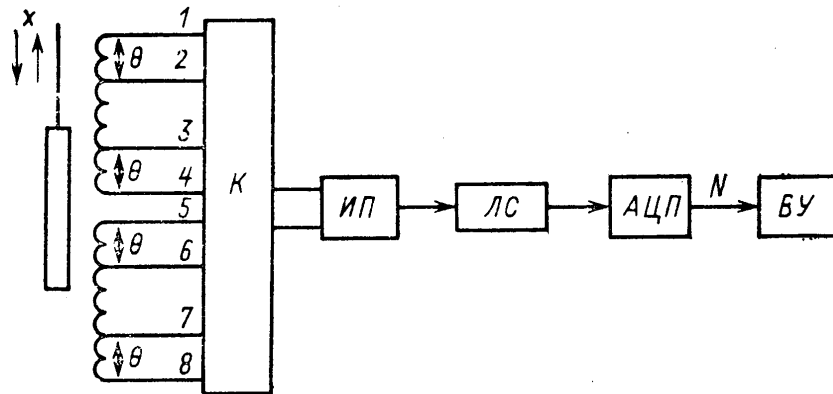


Рисунок 16.26 - Структурная схема канала тестовой ИИС для измерения перемещений

В этом случае выполняются четыре преобразования путем поочередного подключения к ИП выводов 1-5, 5-7, 2-4 и 6-8. Предположим, что ИП имеет линейную функцию преобразования. Пренебрегая погрешностями квантования и нелинейности АЦП, будем считать, что его функция преобразования также линейна. Тогда можно записать (16.27)

$$N_j = c_0 + c_1 L_j, \tag{16.27}$$

где N_j - код на выходе АЦП;

L_j - индуктивность j -й обмотки датчика;

c_0, c_1 - параметры функции преобразования индуктивности в код.

Результаты четырех преобразований при поочередном подключении обмоток датчика запишем в виде (16.28)

$$\begin{aligned}
L_{1-3} &= c_0 + c_1 d_0 + c_1 d_1(x_0 + x) + c_1 d_2(x_0 + x)^2 \\
L_{5-7} &= c_0 + c_1 d_0 + c_1 d_1(x_0 - x) + c_1 d_2(x_0 - x)^2 \\
L_{2-4} &= c_0 + c_1 d_0 + c_1 d_1(x_0 + x + \theta) + c_1 d_2(x_0 + x + \theta)^2 \\
L_{6-8} &= c_0 + c_1 d_0 + c_1 d_1(x_0 - x - \theta) + c_1 d_2(x_0 - x - \theta)^2
\end{aligned} \tag{16.28}$$

Решив систему уравнений (16.28), получим (16.29)

$$x = (N_1 - N_2) / [(N_3 - N_4) - (N_1 - N_2)], \quad (16.29)$$

Вычисление значения измеряемого перемещения по (16.29) осуществляется в ВУ. Можно показать, что вычисленное значение перемещения x не зависит от параметров c_0, c_1, d_0, d_1, d_2 датчика перемещений и всего измерительного канала, а достижимая точность определяется идентичностью двух половин дифференциального датчика и стабильностью значения (16.29).

Другим примером использования структурной избыточности и соответствующих алгоритмов обработки измерительной информации с целью повышения точности измерений является применение двухканальных преобразователей уровня жидкости. Как отмечалось выше, выходная величина резонансных электромагнитных датчиков уровня зависит от диэлектрической проницаемости контролируемой жидкости. В общем случае функция преобразования таких датчиков может быть представлена в виде (16.30)

$$(\omega/\omega_o)^2 = 1 + (\varepsilon - 1) f(x), \quad (16.30)$$

где ω - частота генерации (выходной параметр);

ε - диэлектрическая проницаемость жидкости;

ω_o - постоянная величина;

$f(x)$ - функция измеряемого уровня x , зависящая от конструкции конкретного датчика.

Для повышения точности измерений используются два аналогичных датчика, имеющих разные функции $f(x)$. Отличие функций $f(x)$ может быть реализовано включение различных нагрузок на концах отрезков линий, образующих датчики; например, один отрезок короткозамкнут, другой разомкнут.

В этом случае выходные параметры обоих датчиков будут определяться уравнениями (16.31) и (16.32)

$$(\omega_1/\omega_{o1})^2 = 1 + (\varepsilon - 1) f_1(x), \quad (16.31)$$

$$(\omega_2/\omega_{o2})^2 = 1 + (\varepsilon - 1) f_2(x), \quad (16.32)$$

Значения выходных параметров датчиков преобразуем в соответствии с формулой (16.33)

$$y = [(\omega_1/\omega_{o1})^2 - 1] / [(\omega_2/\omega_{o2})^2 - 1] = f_1(x) / f_2(x) = F(x), \quad (16.33)$$

Очевидно, что вычисленное по (16.33) значение y является функцией измеряемого уровня x и не зависит от значения диэлектрической проницаемости ε .

Таким образом, рассмотренные выше методы позволяют обеспечить высокую точность измерений различных физических величин в изменяющихся условиях эксплуатации при использовании относительно неточных, но простых и надежных измерительных преобразователей.

16.2.3 Измерение давлений, сил и крутящих моментов

Значительную долю измерений, выполняемых в промышленности, составляют измерения давлений, сил и крутящих моментов. В большинстве случаев указанные физические величины предварительно преобразуются в линейное или угловое перемещение или в деформацию, которые в свою очередь преобразуются в электрический сигнал. Измерение давлений уже рассмотрены в разделе 14.2 «Измерение давлений».

Измерение сил и крутящих моментов.

При измерениях сил и крутящих моментов чаще всего используются упругие элементы, осуществляющие преобразование этих физических величин в линейное или угловое перемещение или деформацию. Для восприятия больших усилий (свыше 10 кН) используются, как правило, сплошные стержни; для меньших усилий (1-10 кН) - полые тонкостенные стержни и кольца, а для малых усилий - плоские пружины, и мембраны с жестким центром. Для преобразования крутящего момента в угловое перемещение используются сплошные и полые валы круглого и квадратного сечения, подвесы, растяжки и спиральные пружины. Описанные упругие элементы применяются совместно с преобразователями деформаций или преобразователями угловых или линейных перемещений различных типов. При измерениях сил и моментов также используются преобразователи в электрический параметр, не требующее применения дополнительных упругих элементов. К таким преобразователям относится, например, магнитоупругий датчик силы, емкостные и пьезоэлектрические преобразователи силы. Действие емкостных преобразователей силы основано на деформации изоляции между обкладками конденсатора под воздействием силы, что приводит к изменению емкости. Действие пьезоэлектрического преобразователя силы принципиально не отличается от действия рассмотренного выше пьезоэлектрического преобразователя давления Z J.

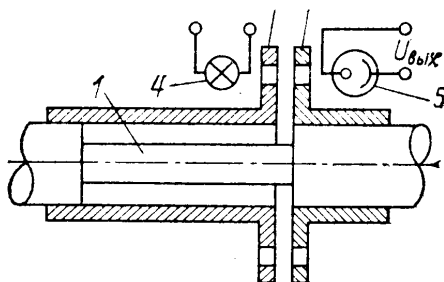


Рисунок 16.27 - Фотоэлектрический преобразователь момента

При измерениях силы иногда находят применение струнные преобразователи, действие которых основано на зависимости собственной частоты колебаний натянутой струны от силы натяжения. Выходной величиной преобразователя в этом случае является частота выходного сигнала. При измерениях крутящего момента на вращающемся валу предпочтение отдается преобразователям, которые не требуют проводников для подвода тока к вращающимся частям. К таким преобразователям, в частности, относятся: фотоэлектрический преобразователь момента, индуктивный преобразователь с неподвижными обмотками, фазоимпульсный преобразователь момента. Так, например, фотоэлектрический преобразователь момента (рисунок 16.27) содержит два диска, укрепленных на концах базового участка вала I . В дисках прорезаны радиальные щели, через которые луч света от источника 4 проходит к фотоэлементу 5 . При отсутствии крутящего момента щели в дисках совпадают. При увеличении крутящего момента возрастает угловой сдвиг между щелями в дисках, в результате чего уменьшается средняя освещенность фотоэлемента.

16.2.4 Измерение скоростей и ускорений

Так как скорость и ускорение взаимосвязаны с изменяющимся перемещением, то для их измерения могут быть использованы преобразователи перемещения, выходной сигнал которых подвергается дифференцированию. При выполнении дифференцирования аналогового сигнала в зависимости от вида сигнала и требуемой точности применяют пассивные дифференцирующие цепи, трансформаторы (ЭДС на вторичной обмотке пропорциональна скорости изменения магнитного потока) и активные дифференцирующие цепи (на базе операционных усилителей).

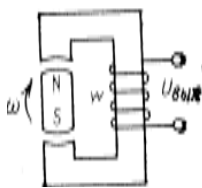


Рисунок 16.28 - Тахогенератор

Индукционные преобразователи скорости. Принцип действия индукционных преобразователей рассмотрен на рисунке 16.28, где изображен индукционный преобразователь, выходной сигнал которого пропорционален скорости линейного перемещения катушки. Широкое распространение на практике получили индукционные преобразователи угловых скоростей (тахогенераторы). На рисунке 16.28 схематически показан тахогенератор с вращающимся постоянным магнитом. В зазоре магнитопровода расположен постоянный магнит, связанный с контролируемым объектом. При вращении

магнита изменяется магнитный поток, пронизывающий обмотку ω . Подбирая определенную форму магнита и полюсов магнитопровода, можно добиться синусоидального изменения магнитного потока в магнитопроводе при вращении магнита. Амплитуда выходного напряжения и его частота пропорциональны частоте вращения ω магнита. Существуют также тахогенераторы переменного тока с вращающимся ферромагнитным якорем, в которых магнитный поток создается дополнительной обмоткой возбуждения, а при вращении якоря изменяется магнитное сопротивление цепи, и тахогенераторы переменного тока с короткозамкнутым ротором. Иногда используются тахогенераторы постоянного тока, представляющие собой генератор с коллектором и щетками и возбуждением от постоянных магнитов или от внешнего источника постоянного тока. Электростатические преобразователи скорости. В простейшем случае электростатический преобразователь скорости выполнен в виде конденсатора, одна из пластин которого перемещается относительно другой со скоростью V . Принцип действия таких преобразователей основан на следующем явлении: при изменении емкости C конденсатора.

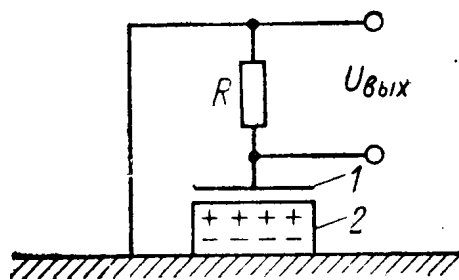


Рисунок 16.29 - Преобразователь скорости с электретом

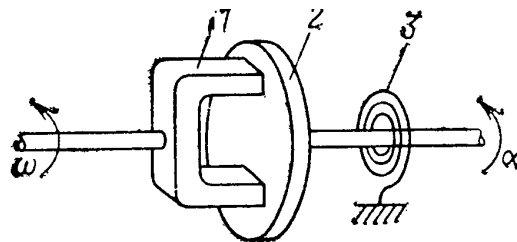


Рисунок 16.30 - Индукционный преобразователь скорости.

Индукционный преобразователь скорости, к которому приложено постоянное напряжение U , его зарядный ток (изменяется пропорционально скорости изменения емкости) вычисляется по формуле (16.34)

$$i = dq/dt == U (dC/dt), \quad (16.34)$$

где $q=UC$ - заряд конденсатора.

Если изменение емкости пропорционально перемещению пластины конденсатора, то выходной ток пропорционален скорости этого перемещения.

В последние годы вместо конденсатора с источником питания используют электреты. Электрет представляет собой диэлектрик, имеющий постоянную поляризацию. Плотность остаточных зарядов электретов составляет примерно 10^{-7} - 10^{-8} Кл/см². Заряд сохраняется в течение многих лет. Преобразователь скорости с электретом (рисунок 16.29) состоит из конденсатора с подвижным электродом 1 и электрета 2. Выходной ток преобразователя имеет значения около 10^{-7} А.

Преобразователи скорости с вязким трением. Принцип действия этих преобразователей основан на зависимости усилия от скорости перемещения тела, преодолевающего вязкое трение. В преобразователях скорости гидравлической системы поршень, связанный с контролируемым объектом, движется в цилиндре с жидкостью. При этом на цилиндр действует сила, пропорциональная скорости.

Широкое распространение получили преобразователи скорости индукционной системы (рисунок 16.30). Преобразователь состоит из постоянного магнита 1 и диска 2 из электропроводного материала, укрепленных на полуосях. Между диском и магнитом имеется воздушный зазор. При перемещении магнита относительно диска в последнем индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с потоком постоянного магнита создает момент, вращающий диск 2. С помощью спиральной пружины 3 этот момент преобразуется в угол поворота α . В результате угол поворота α пропорционален угловой скорости ω вращения магнита. В дальнейшем этот угол α преобразуют в электрический сигнал преобразователем угловых перемещений.

Корреляционный и доплеровский методы измерения скорости. Сущность корреляционного метода измерения скорости можно проиллюстрировать на примере измерения скорости движения ленты (рисунок 16.31). Лента 1 движется со скоростью V . На расстоянии l друг от друга установлены две оптические системы, содержащие осветители 2 и 5 и оптоэлектрические преобразователи 3 и 6. Выходные сигналы преобразователей 3 и 6 усиливаются усилителями 4 и 7 и подаются на входы коррелятора 9, причем сигнал с выхода усилителя 4 проходит через блок регулируемой задержки 8. Неоднородность поверхности контролируемой ленты приводит к модуляции яркости сигналов, воспринимаемых оптоэлектрическими преобразователями, и соответственно к модуляции электрических сигналов на выходах усилителей 4 и 7. Очевидно, что взаимная корреляционная функция этих сигналов будет иметь максимум при временном сдвиге $\tau_x = l/V$, равном времени прохождения лентой расстояния l между оптическими системами. Задержка сигнала с выхода усилителя 4 на время τ_x осуществляется блоком регулируемой задержки 8, который управляется сигналом с выхода экстремального регулятора 10, обеспечивающего максимальное значение сигнала на выходе коррелятора 9. Величина u , пропорциональная задержке τ_x сигнала в блоке 8, выводится на отсчетное устройство 11, шкала которого может быть проградуирована непосредственно в единицах скорости движения. Корреляционный метод измерения скорости

находит практическое применение в таких задачах, как измерение скорости проката, скорости движения судна (относительно дна водоема) и т. п. При этом обеспечивается весьма высокая точность измерений. Так, погрешность корреляционного измерителя скорости проката составляет 0,1 %.

Для дистанционного измерения скоростей самолетов, автомобилей и других быстро движущихся объектов используют доплеровские измерители скорости. Как известно, эффект Доплера заключается в том, что если передатчик, или приемник, или отражатель радиоволн (акустических волн) сближается (удаляется) со скоростью V , то частота принятого сигнала отличается от частоты излученного сигнала на величину, пропорциональную этой скорости. Поэтому выходной величиной доплеровских преобразователей скорости является частота, равная разности частот излученного и принятого сигналов.

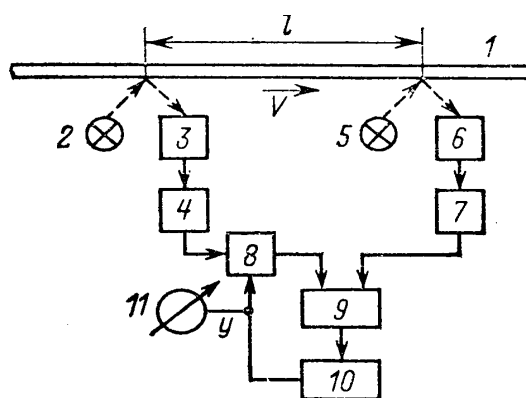


Рисунок 16.31 - Структурная схема прибора для измерения скорости движения ленты

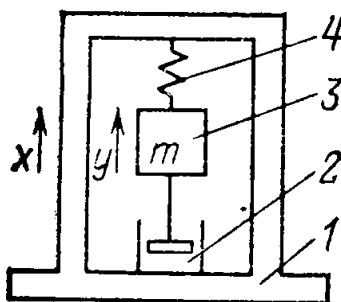


Рисунок. 16.32 - Преобразователь ускорений сейсмического типа

Преобразователи ускорения. Для измерения ускорений могут быть применены датчики перемещения или скорости, выходной сигнал которых дифференцируется соответствующее число раз. Однако наибольшее распространение на практике получили преобразователи ускорений сейсмического типа. Отличительной особенностью указанных преобразователей является отсутствие механической связи между контролируемым объектом и неподвижным, относительно которого этот объект перемещается.

Принцип действия преобразователя сейсмического типа иллюстрируется на рисунке 16.32.

Преобразователь состоит из корпуса 1, которому сообщается входное перемещение x с ускорением $a = d^2x/dt^2$, массивного тела (инерционной массы) 3, упруго укрепленного к корпусу через систему упругих элементов (пружин) 4, и демпфера 2. Сила, действующая на массу m под воздействием ускорения a , равна $F = ma$ и вызывает перемещение y инерционной массы 3 относительно корпуса 1 до тех пор, пока эта сила не уравнивается противодействующей силой сжатой пружины 4. При этом перемещение y и ускорение a связаны соотношением (16.35)

$$y = msa, \quad (16.35)$$

где $s = 1/W$ - эластичность пружины;
 W - жесткость пружины.

Полученное перемещение y преобразуется далее в электрический сигнал преобразователем перемещений того или иного типа.

Для улучшения динамических свойств преобразователя при работе с изменяющимися ускорениями в его конструкцию вводится демпфер 2, использующий вязкое трение для создания силы, пропорциональной скорости движения инерционной массы относительно корпуса и равной

$$F\partial = R (dy/dt),$$

где R - коэффициент вязкого трения.

В этом случае движение инерционной массы относительно корпуса описывается операторным способом.

При измерениях изменяющихся ускорений и, в частности, колебательных процессов представляет интерес амплитудно-частотная характеристика преобразователя (16.36)

$$y(p) = \frac{T_1 T_2 p^2 x(p)}{T_1 T_2 p^2 + T_2 p}, \quad (16.36)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{T_1 T_2} = \sqrt{W/m}$ - собственная частота колебаний;

$\beta = \omega/\omega_0$ - отношение частоты вынужденных колебаний к частоте собственных колебаний;

$\nu = (1/2)\sqrt{T_1/T} = R/2\sqrt{mW}$ - коэффициент демпфирования.

Анализ (16.36) показывает, что динамические погрешности преобразователя малы при коэффициентах демпфирования $\nu = 0,6-0,7$ и при измерениях ускорений, меняющихся с частотой $\omega < 0,25\omega_0$.

Преобразователь сейсмического типа при соответствующем выборе параметров и схемы включения может быть использован для измерения параметров вибраций, в частности вибрационных перемещений и скоростей.

Преобразователь вибрационных перемещений (вибродатчик) отличается от преобразователя ускорений другим соотношением частот ω и ω_0

Из (16.36) следует, что при $\nu = 0,5-0,6$ и $\omega > 3\omega_0$ отношение $y/x \sim 1$, т. е. инерционная масса 3 остается практически неподвижной, а корпус колеблется относительно нее с перемещением x .

16.2.5 Измерение расхода

Среди измерений, выполняемых в промышленности, большое место занимают измерения расхода, т. е. измерения количества вещества, проходящего в единицу времени через какое-либо сечение трубопровода, канала и т. п. Расход, как и количество вещества, выражают в объемных или массовых единицах измерения, которые связаны между собой через плотность вещества.

Значения измеряемых расходов могут лежать в диапазоне от 10^{-3} до нескольких тысяч кубометров в час. В то же время расходимые вещества могут сильно отличаться по своим физико-химическим свойствам. Это могут быть газы, нейтральные жидкости, электролиты, жидкие металлы. Все это в сочетании с разнообразными условиями применения и различными требованиями к точности, надежности и стоимости определяет значительное число типов и конструкций средств измерений расхода, а также потребность в разработке новых, более совершенных расходомеров. С учетом изложенного выше рассмотрим некоторые наиболее распространенные типы преобразователей расхода. Преобразователи расхода с переменным перепадом давлений. Принцип действия преобразователей данного типа основан на измерении перепада давления на сужающем устройстве, установленном на пути движущейся среды. В качестве сужающего устройства используют диафрагму, сопло и т. п. На рисунке 16.33 схематически изображен преобразователь расхода, в котором для создания перепада давлений используется диафрагма 1, а для преобразования разности давлений дифференциальный манометрический преобразователь 2. Перепад давлений ΔP связан с измеряемым расходом Q зависимостью вида (16.37)

$$\Delta P = kQ^2, \quad (16.37)$$

где k -коэффициент, зависящий от параметров сужающего устройства, плотности и вязкости вещества.

Таким образом, для получения линейной зависимости выходной величины от расхода необходимо осуществить операцию извлечения квадратного корня. В противном случае расходомер может работать лишь в небольшом диапазоне расходов. Для улучшения линейности функции преобразования иногда применяют более сложные дифференциальные конструкции.

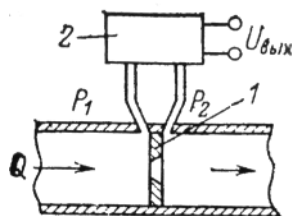


Рисунок 16.33 - Преобразователь расхода с переменным перепадом давлений

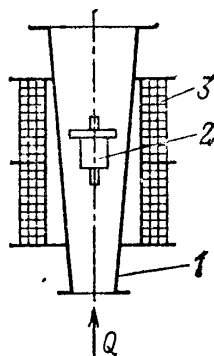


Рисунок 16.34 - Ротаметр

Преобразователи расхода с постоянным перепадом давлений. Действие преобразователей этого типа основано на непрерывном регулировании площади проходного сечения сужающего устройства в зависимости от перепада давлений на нем с тем, чтобы поддерживать перепад постоянным. Выходной величиной преобразователя в этом случае является величина, однозначно связанная с проходным сечением. Выбором соответствующего закона изменения проходного сечения можно обеспечить линейность функции преобразования. Примером преобразователей расхода указанного типа является ротаметр (рисунок 16.34), представляющий собой коническую трубку 1, в которой свободно перемещается цилиндрический поплавок 2. Жидкость проходит в кольцевом зазоре между поплавком и трубкой.

Перепад давлений ΔP , действующий на площадь поплавка S_n , стремится поднять его. вверх до тех пор, пока подъемная сила не уравнивается весом поплавка, т.е. будет справедливо равенство (16.38)

$$S_n \Delta P = V_n g (\rho_n - \rho), \quad (16.38)$$

где V_n - объем поплавка;

ρ_n - плотность поплавка;

ρ - плотность жидкости;

g - ускорение силы тяжести.

Выходной величиной преобразователя является высота подъема поплавка. Перемещение поплавка преобразуется в электрический сигнал чаще

всего с помощью индуктивных датчиков. На рисунке 16.34 показан дифференциальный индуктивный преобразователь перемещений, ферромагнитный сердечник которого запрессован в поплавок 2. Перемещением катушки 3 вдоль трубки 1 можно изменять диапазон измеряемых расходов.

Ротаметры отличаются простотой конструкции, но имеют невысокую точность (погрешность 2-3 %) и используются для измерения малых расходов жидкостей и газов (10^{-7} - 10^{-6} м³/с).

Преобразователи скоростного напора. Действие преобразователей данного типа основано на использовании кинетической энергии движущейся струи. При торможении потока среды в каком-либо его сечении кинетическая энергия струи создает избыточное давление, вычисляемое по формуле (16.39)

$$P_d = \alpha \rho V^2 / 2, \quad (16.39)$$

где ρ - плотность среды;

V - скорость среды;

α - коэффициент, зависящий от формы преграды на пути жидкости.

Измерив значение избыточного давления, можно определить значение скорости среды в данном сечении. Если известно поле скоростей по всему сечению канала, то может быть определен расход.

Различают преобразователи, использующие трубки скоростного напора, и преобразователи гидродинамического сопротивления тела.

На рисунке 16.35 изображен преобразователь с трубками скоростного напора (трубкой Пито). В поток вводятся две трубки, подключенные к преобразователю перепада давлений. Плоскости входных отверстий трубок расположены перпендикулярно и параллельно направлению потока. В первой трубке поток тормозится, поэтому полное давление P_1 в ней превышает давление среды P на величину ΔP . Давление во второй трубке равно давлению P в трубопроводе. Разность давлений равна ΔP и преобразуется в напряжение $u_{\text{вых}}$ дифференциальным манометрическим преобразователем. Недостатками описанного преобразователя являются квадратичный характер функции преобразования и зависимость выходной величины от плотности среды.

В преобразователях гидродинамического сопротивления в поток жидкости вводится тело (заслонка) определенной формы. При этом сила гидродинамического давления, действующая на заслонку, пропорциональна квадрату скорости потока и зависит от эффективной площади заслонки. Выходной величиной таких преобразователей обычно является угол поворота заслонки, преобразуемый затем в электрический сигнал.

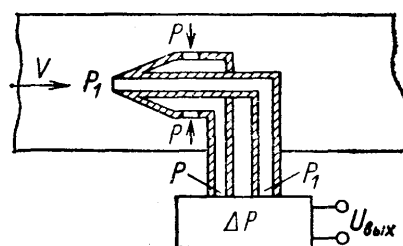


Рисунок 16.35 - Преобразователь скоростного напора

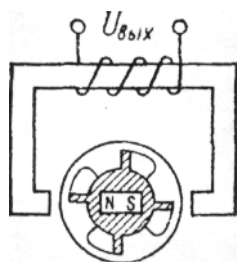


Рисунок 16.36 - Турбинный преобразователь расхода

Турбинные преобразователи расхода. Действие турбинных преобразователей расхода основано на преобразовании частоты вращения крыльчатки, помещенной в поток. При турбулентном движении среды частота вращения связана с объемным расходом линейной зависимостью. Применяют крыльчатки различной формы, но наибольшее распространение получили спиральные крыльчатки, как наиболее простые по конструкции и обеспечивающие высокую точность (0,1-0,5 %). Преобразователи со спиральными крыльчатками изготавливаются на расходы жидкостей от 10^{-2} до $7 \cdot 10^3$ м³/ч, для газов до $20 \cdot 10^3$ м³/ч. На рисунке 16.36 иллюстрируется работа турбинного преобразователя расхода с индукционным преобразователем частоты вращения крыльчатки.

Поток жидкости вращает крыльчатку, в корпусе которой находится постоянный магнит. Если трубопровод выполнен из немагнитного материала, то при вращении крыльчатки происходит модуляция магнитного потока в наружном магнитопроводе. В результате с выходной обмотки снимается напряжение, частота которого пропорциональна измеряемому объемному расходу.

Инерционность таких преобразователей невелика, постоянная времени зависит от типа и конструкции вращающегося элемента и составляет 1-50 мс.

Турбинные преобразователи применяются для измерений не только объемного, но и массового расхода. В последнем случае преобразователи имеют более сложную конструкцию. При измерении массового расхода обычно осуществляют искусственное закручивание контролируемого потока с помощью принудительно вращаемой крыльчатки. При этом подводимая мощность и вращающий момент пропорциональны массовому расходу продукта.

Другой разновидностью турбинных преобразователей массового расхода являются преобразователи, в которых предварительно закрученный поток воздействует на другую крыльчатку, создавая крутящий момент, пропорциональный массовому расходу.

Индукционные преобразователи расхода. Для измерения расхода электропроводящей жидкости широко используются индукционные преобразователи. Их действие основано на том, что если проводящая жидкость движется в постоянном или переменном магнитном поле, направление которого не совпадает с направлением движения жидкости, то в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости ее движения. Эта ЭДС является причиной возникновения токов в жидкости и соответствующего реактивного магнитного поля, которые также пропорциональны скорости движения жидкости, а следовательно, расходу.

Для бесконтактного измерения расхода могут применяться индукционные преобразователи, реагирующие на значение реактивного магнитного поля вихревых токов в жидкости, но наибольшее распространение на практике благодаря простоте конструкций и высокой чувствительности получили контактные индукционные расходомеры, в которых измеряется разность потенциалов между помещенными в жидкость электродами. Принцип действия таких расходомеров иллюстрируется на рисунке 16.37.

Контролируемая электропроводящая жидкость течет в трубопроводе 2 из изоляционного материала, помещенном между полюсами 1 магнитопровода, создающего постоянное или переменное магнитное поле. В трубопроводе размещены электроды 3, с которых снимается разность потенциалов, пропорциональная расходу. Чаще всего используют переменное магнитное поле, создаваемое электромагнитом, так как при этом на результат измерения не влияет поляризация электродов. Трубопровод может иметь не только прямоугольное, но и круглое сечение.

Индукционные расходомеры имеют ряд существенных достоинств. Они практически безынерционны и могут применяться для измерения переменного (например, пульсирующего) расхода. Их выходная величина слабо зависит от таких параметров жидкости, как давление, плотность, вязкость, температура. Создаваемое ими дополнительное сопротивление потоку жидкости также незначительно. Погрешность индукционных преобразователей лежит в пределах 0,5-1,5 %; диаметр трубопроводов, в которых может измеряться расход, изменяется от единиц миллиметров до 3 м.

Основным недостатком индукционных расходомеров является практическая невозможность их использования для измерения расхода диэлектрических жидкостей. Удельное сопротивление контролируемой жидкости не должно превышать $10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

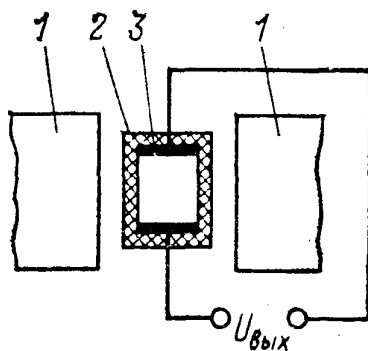


Рисунок 16.37 - Индукционный преобразователь расхода

Ультразвуковые преобразователи расхода. Действие ультразвуковых преобразователей расхода основано на том, что скорость распространения звуковой волны в движущейся среде равна геометрической сумме скорости звука C в неподвижной среде и скорости среды V . Если измерить суммарную скорость, то при известном значении C и известном угле между векторами можно определить скорость потока V , а следовательно, и расход жидкости.

Измерение скорости звука в движущейся среде обычно осуществляется путем определения интервала времени t , в течение которого звуковая волна проходит известное расстояние L . Наибольшее распространение на практике получили время - импульсный и фазовый методы измерений.

При время - импульсном методе измерения сигнал в виде ультразвукового импульса излучается излучателем $Изл$ и принимается приемником $Прм$ (рисунок 16.38). Интервал времени между моментами приема и излучения сигнала находится по формуле (16.40)

$$t = L / (C + V \cos \theta) \approx L (1 - V \cos \theta / C) / C, \quad (16.40)$$

где θ - угол между векторами C и V .

Отсюда при известных значениях L , θ и C находят скорость V .

Применяют дифференциальные схемы с двумя каналами прохождения ультразвука. Движение потока жидкости увеличивает скорость ультразвука в одном канале и соответственно уменьшает в другом. Разность времени прохождения в двух каналах находят по формуле (16.41)

$$\Delta t = 2LV \cos \theta / C^2, \quad (16.41)$$

При фазовом методе измерения излучаются непрерывные гармонические колебания и измеряется разность фаз сигналов. В одноканальной структуре выходной величиной является разность фаз принятого и излученного сигналов

$$\varphi = \omega \Delta t = \omega L / (C + V \cos \theta) \approx \omega L (1 - V \cos \theta / C) / C, \quad (16.42)$$

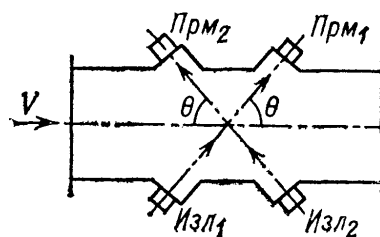


Рисунок 16.38 - Ультразвуковые преобразователи расхода

В двухканальной структуре (рисунок 16.38) оба излучателя питаются от одного генератора, а выходной величиной является разность фаз сигналов на выходах приемников, которая вычисляется по формуле (16.43)

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2\omega LV \cos \theta / C^2 \quad (16.43)$$

Трудность практической реализации описанных методов заключается в том, что скорость реальных потоков гораздо меньше скорости звука ($C \sim 1500$ м/с). В связи с этим измеряемые интервалы времени или фазовые сдвиги оказываются весьма малыми. Для повышения точности ультразвуковых преобразователей расхода в них используют весьма высокие частоты сигналов (единицы мегагерц), а также более сложные структуры преобразователей, позволяющие, в частности, исключить влияние нестабильности скорости C на результат измерения расхода.

Преобразователи расхода других типов. Кроме рассмотренных выше, находят применение и другие типы преобразователей расхода. Так, объемный расход среды может быть определен путем измерения скорости движения какой-либо метки, переносимой средой. В качестве метки используют, например, порцию нагретой жидкости или ионизированного газа. С помощью соответствующих чувствительных элементов определяют время прохождения меткой известного расстояния. Иногда осуществляют непрерывную модуляцию какого-либо параметра среды (например, степени ионизации), тогда выходной величиной является сдвиг фаз между принятым и возбуждающим сигналами.

Для измерения скоростей газовых потоков используются преобразователи на основе терморезисторов - термоанемометры. Их работа основана на том, что установившаяся температура нагреваемого током терморезистора, помещенного в газовый поток, зависит от скорости этого потока. Выходной величиной преобразователя является сопротивление терморезистора. Для уменьшения температурной погрешности в мостовую измерительную цепь, кроме основного, включают дополнительный терморезистор, аналогичный основному, но защищенный от действия потока газа.

Для измерения расхода веществ с большим ядерным моментом (например, жидкостей, содержащих водород и фтор) применяют

преобразователи расхода с использованием явления ядерного магнитного резонанса.

Для измерения расхода газов, находят применение ионизационные преобразователи, в которых движущийся газ ионизируется с помощью тлеющего разряда или радиоактивных изотопов. При этом ионный ток между введенными в поток электродами зависит от скорости движения газа.

17 Методы испытаний и контроля и их метрологическое обеспечение

Испытанием называется экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании, а также моделировании объекта и (или) воздействий (ГОСТ 16504-81). Экспериментальное

Под **условиями испытаний** понимается совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях. В нормативно-технических документах на испытания конкретных объектов определение характеристик свойств объекта при испытаниях может проводиться путем использования измерений, оценивания и контроля.

Объектом испытаний является продукция или процессы ее производства и функционирования. В зависимости от вида продукции и программы испытаний объектом может быть как единичное изделие, так и их партия. Объектом испытания может быть макет или модель изделия.

Важнейшими признаками любых испытаний являются:

- принятие на основе их результатов определенных решений по объекту испытаний, например о его состоянии, как соответствующая продукция или несоответствующая продукция требованиям НД (т.е. годности или браковка), о возможности предъявления на следующие испытания и т.д.;

- задание требуемых реальных или моделируемых условий испытаний должны быть определены нормальные условия испытаний.

Существует большое число разновидностей испытаний. Они классифицируются по различным признакам. По **назначению** испытания делятся на исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные. По **уровню проведения** различают следующие категории испытаний: государственные, межведомственные и ведомственные. По **виду этапов разработки испытываемой продукции** различают предварительные и приемочные испытания. В зависимости от **вида испытаний готовой продукции** их подразделяют на квалификационные, приемосдаточные периодические и типовые. Квалификационные испытания подразделяются на испытания продукции, которая прошла этап конструкторской или рецептурной разработки непосредственно перед решением о постановке ее на производство – квалификационные испытания качества разработки и на испытания продукции, которая прошла этап технологической разработки, т.е. разработка технологических процессов, технологического оборудования, оснастки, инструмента, технологических линий, обучение и подготовка кадров – квалификационные испытания готовности производства к выпуску качественной продукции. Определения этих видов испытаний можно найти в ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения».

Целью испытаний следует считать нахождение истинного значения параметра (характеристики), определенного не при тех реальных условиях, в которых он фактически может находиться в ходе испытаний, а в заданных номинальных условиях испытания. Реальные условия испытаний практически всегда отличаются от номинальных, поскольку установить параметры условий испытаний абсолютно точно невозможно. Следовательно, результат испытания всегда имеет погрешность, возникающую не только из-за погрешности определения искомой характеристики, но и из-за неточного установления номинальных условий испытания.

Результатом испытаний называется оценка характеристик свойств объекта, установления соответствия объекта заданным требованиям, данные анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний. Результат испытаний характеризуется **точностью** — свойством испытаний, описывающим близость их результатов к действительным значениям характеристик объекта в определенных условиях испытаний.

Между измерением и испытанием существует большое сходство: во-первых, результаты обеих операций выражаются в виде чисел; во-вторых, погрешности и в том, и другом случае могут быть выражены как разности между результатами измерений (испытаний) и истинными значениями измеряемой величины (или определяемой характеристики при номинальных условиях эксплуатации). Однако с точки зрения метрологии между этими операциями имеется значительная разница: погрешность измерения является только одной из составляющих погрешности испытания. Поэтому можно сказать, что испытание — это общая операция, чем измерение. Измерение можно считать частным случаем испытания, при котором условия испытаний не представляют интереса. Кроме того, параметры испытаний назначаются, исходя из требований превзойти параметры образцов — аналогов, так, чтобы опытные образцы испытаний получили эксплуатационные свойства лучше международных аналогов этой же продукции, такие параметры называют номинальными — X_N .

17.1 Средства испытаний

В качестве средств испытаний можно привести машины испытания твердости металлов, машины испытания металлов на разрыв, изгиб-перегиб, копры ударной нагрузки, прессы Роквелла, Виккерса, машины вибрационных нагрузок — вибростенды, аэродинамические трубы, гидродинамические бассейны, испытательные полигоны, атмосферное состояние местности в различных географических точках земного шара и т.д. В главах 15 — 16 некоторые средства измерений нами не показаны, а перенесены в главу 17, так как они лучше иллюстрируют свои свойства и с точки зрения измерений, и с точки зрения испытаний и контроля.

Далее приводятся рисунки и описание различных средств измерений при испытаниях и в составе стендовых испытаний.

17.1.1 Ареометры. Классификация ареометров /32/

Различают ареометры постоянного объема и ареометры постоянной массы. Ареометр постоянного объема погружается в жидкость всегда на одну и ту же глубину, в то время как глубина погружения ареометра постоянной массы различна в зависимости от плотности испытуемой жидкости.

Ареометр постоянного объема состоит из полого продолговатого металлического или стеклянного корпуса цилиндрической формы, переходящего вверху в тонкий стержень, на конце которого имеется тарелка (чашка) для закладывания гирь. Для устойчивости корпус снабжен балластом. На стержне нанесена метка, до которой должен погружаться ареометр при определенной плотности жидкости и определенной массе гирь. О плотности исследуемой жидкости судят по массе гирь, снятых или добавленных для того, чтобы ареометр погрузился в данную жидкость до метки.

Ареометры постоянной массы по своему назначению делятся на две группы:

- 1) для измерения плотности жидкостей (называются денсиметрам и шкалы денсиметров градуированы в единицах плотности);
- 2) для измерения концентрации растворов; шкалы этих ареометров градуированы в процентах по объему или массе.

Денсиметры подразделяются на:

- а) денсиметры общего назначения, служащие для измерения плотности различных жидкостей легче и тяжелее воды (водные растворы кислот, солей, щелочей и др.);
- б) нефтенденсиметры (для измерения плотности нефтепродуктов);
- в) лактоденсиметры (для измерения плотности молока и сыворотки);
- г) денсиметры для морской воды;
- д) урометры (для измерения плотности мочи);
- е) аккумуляторные денсиметры (для измерения плотности раствора электролита в аккумуляторах);
- ж) денсиметры АК (для жидкостей типа кислот).

К ареометрам для измерения концентрации растворов относятся:

- а) спиртомеры - для измерения крепости (концентрации) водно-спиртовых растворов, определяемой процентным (по объему) содержанием безводного спирта в растворе;
- б) сахаромеры - для определения процентного (по массе) содержания сухих веществ в сахарных растворах;
- в) клеомеры - для определения концентрации клеевых растворов, выраженной процентным (по массе) содержанием костного клея в воде;
- г) гидрометры - для определения процентного (по объему) содержания этиленгликоля в его водном растворе.

Ареометры постоянной массы бывают стеклянные и металлические. В большинстве случаев применяются стеклянные ареометры, обеспечивающие более высокую точность измерений, так как стекло обладает наилучшей смачиваемостью жидкостями, однако в ряде случаев незаменимыми

оказываются металлические приборы. Так, для измерения плотности жидких металлов при высокой температуре используют металлические ареометры, изготовленные из стали с эмалевым покрытием или из вольфрамового сплава.

Ареометры постоянной массы по их метрологическому назначению (т. е. по назначению в схеме передачи размера единицы плотности) делятся на эталонные, образцовые и рабочие.

В различных отраслях промышленности и народного хозяйства непосредственно для измерения плотности жидкостей или концентрации растворов применяют рабочие ареометры. Образцовые ареометры служат для проверки рабочих ареометров, а эталонные - для проверки образцовых ареометров.

Устройство стеклянных ареометров

Ареометр представляет собой симметричное относительно продольной оси удлиненное тело, состоящее из полого корпуса цилиндрической (рисунок 17.1 а) или веретенообразной (рисунок 17.1 б) формы и припаянного к нему в верхней части стержня. Стержень выполнен в виде тонкостенной цилиндрической трубки круглого сечения с запаянным концом. У образцовых ареометров и у спиртомеров с ценой деления шкалы 0,1 % допускается конусности стержня не более 0,0005, у остальных спиртомеров, лактоденсиметров и сахарометров - не более 0,001.

Нижняя часть, ареометра заполнена балластом, который неподвижно закреплен при помощи связующего вещества (смолки, сургуча), размягчающегося при температуре не ниже 70 °С (у клеемеров - не ниже 87 °С). Балласт предназначен для понижения центра тяжести ареометра, чтобы последний при погружении в жидкость плавал в строго вертикальном положении и находился при этом в устойчивом равновесии. Балластом служит мелкая дробь, металлическая высечка или ртуть, которые должны быть сухими и чистыми. Существуют также ареометры с обособленной балластной камерой, которая соединена с нижней частью корпуса.

К внутренней поверхности стержня ареометра прочно приклеена прозрачным клеем плотная бумажная полоска белого цвета, на которой нанесена шкала, соответствующая назначению ареометра.

Цена деления шкалы устанавливается числовыми значениями следующего ряда:

а) у денсиметров - 0,0001; 0,0002; 0,0005; 0,002; 0,005; 0,01 и 0,02 г/см³ (или единиц относительной плотности);

б) у ареометров для измерения концентрации - 0,1; 0,2; 0,5 и 1 %.

Ширина штрихов шкалы не превышает 0,2 мм (у образцовых ареометров и у спиртомеров с ценой деления шкалы 0,1 % - не более 0,1 мм). Длина основных штрихов (т. е. штрихов, обозначенных цифрами) составляет не менее 1/4 длины окружности в поперечном сечении стержня, длина наименьших штрихов - не менее 1/8 длины окружности (для образцовых ареометров — соответственно 1/2 и 1/4 длины окружности).

Расстояние между соседними штрихами, как правило, не менее 0,75 мм. У денсиметров для морской воды, аккумуляторных денсиметров, урометров, спиртомеров, клеемеров и гидрометров это расстояние составляет не менее 1 мм, у сахарометров — не менее 1,2 мм, у лактоденсиметров - не менее 1,5 мм, у денсиметров для определения плотности малых количеств жидкости - не менее 0,5 мм.

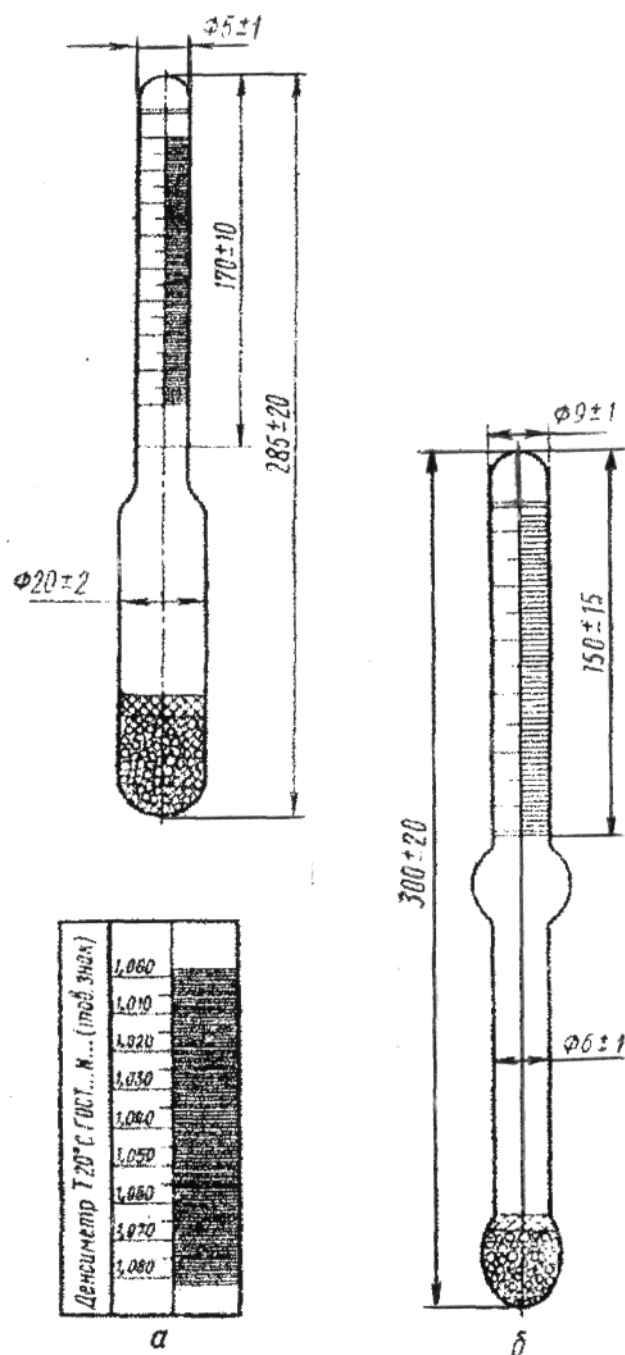


Рисунок 17.1 - Денсиметры общего назначения типа II (а) и типа III (б)

Некоторые типы рабочих ареометров (нефтеденсиметры, лактоденсиметры, сахарометры, клеемеры, спиртомеры, гидрометры) изготовляют со встроенным термометром, позволяющим одновременно с

плотностью (концентрацией) измерять и температуру жидкости. Жидкость, заполняющая резервуар термометра (ртуть, толуол), служит также частью балласта ареометра. Резервуар термометра может располагаться как под основным балластом ареометра, так и над ним.

Бумажная полоска с нанесенной на ней термо - метрической шкалой помещается либо внутри корпуса ареометра (у нефтенсисиметров, спиртомеров, сахарометров и гидрометров), либо в верхней (расширенной) части стержня (у лактоденсисиметров и клеемеров, так как они предназначены для непрозрачных жидкостей).

Основные технические характеристики ареометров

Допускаемая погрешность показаний рабочих ареометров не превышает цены деления шкалы. В виде исключения у спиртомеров с ценой деления шкалы 1 % и у гидрометров допускаемая погрешность не превышает половины цены деления, т. е. соответственно $\pm 0,5$ и ± 1 %.

Цена деления шкалы термометра, встроенного в ареометр, как правило, 1 °С. Исключение составляют гидрометры, у которых цена деления термометрической шкалы равна 2 °С. Допускаемая погрешность термометра не превышает 0,5 цены деления шкалы.

Денсисиметры общего назначения имеют основные технические характеристики, указанные в таблице 17.1.

Таблица 17.1 – Основные технические характеристики денсиметров

Тип	Назначение	Цена деления шкалы, г/см ³	Длина, мм	Пределы измерения, г/см ³	Число приборов в наборе
1	2	3	4	5	6
I	Для определения плотности малых количеств жидкости легче и тяжелее воды	0,001	150 ± 20	От 0,700 – 0,760 до 1,780 – 1,840	19
II а	Для определения плотности жидкости тяжелее воды	0,001	285 ± 20	От 1,000 – 1,080 до 1,750 – 1,840	10
II б	То же	0,001	340 ± 20	От 1,840 – 1,920 до 1,920 – 2,000	2
III а	Для определения плотности жидкости легче воды	0,005	300 ± 20	0,700 – 1,000	1
III б	Для определения плотности жидкости тяжелее воды	0,01	300 ± 20	1,00 – 1,50	1
III в	То же	0,02	300 ± 20	1,00 - 1,80	1

Нефтеденсиметры изготовляют двух типов (оба со встроенным термометром):

1) типа А (длина (470 ± 30) мм) с ценой деления шкалы 0.0005 г/см³, пределами измерений плотности от 0,6500 - 0,7100 до 1,0100-1,0700 г/см³ (набор из семи приборов) и температуры от -20 до +45 °С (рисунок 17.2);

2) типа Б (длина (280 ± 20) мм) с ценой деления шкалы 0,001 г/см³, пределами измерений плотности от 0,670-0,750 до 0.990-1,070 г/см³ (набор из пяти приборов) и температуры от -20 до +35 °С.

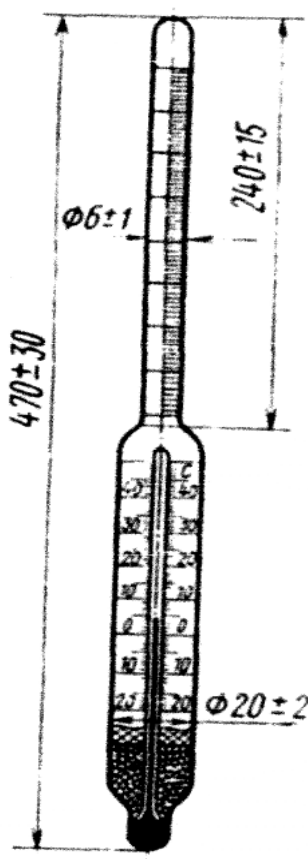


Рисунок 17.2 - Нефтеденсиметр типа А

Принцип действия ареометра. Особенности шкалы.

При погружении в жидкость ареометр согласно закону Архимеда испытывает действие выталкивающей силы, равной весу вытесненной ареометром жидкости. По мере погружения ареометра постепенно увеличивается вес жидкости в объеме погруженной части ареометра, т.е. возрастает выталкивающая сила. В тот момент, когда выталкивающая сила становится равной весу всего ареометра, наступает состояние равновесия.

Глубина погружения, при которой ареометр приходит в равновесие и начинает плавать, зависит от плотности жидкости: чем больше плотность, тем меньше должна быть глубина погружения ареометра, чтобы вес жидкости в объеме погруженной части стал равен общему весу ареометра; наоборот, чем меньше плотность жидкости, тем больше глубина погружения ареометра.

Таким образом, числовые значения плотности на шкале ареометра должны располагаться в возрастающем порядке сверху вниз (рисунке 17.1 а), т.е. штрихи, соответствующие меньшей плотности, должны находиться в верхней части шкалы, а штрихи соответствующие большей плотности, - в нижней. То же относится к ареометрам для измерения концентрации растворов, плотность которых прямо пропорциональна концентрации; у этих ареометров (сахарометров, клеометров, гидрометров) указанные на шкале значения

концентрации возрастают сверху вниз. Плотность водноспиртовых растворов увеличивается по мере уменьшения крепости раствора, поэтому на шкале спиртомера числа возрастают снизу вверх.

Шкала ареометра неравномерная: деления шкалы, т.е. расстояния между двумя смежными штрихами, постепенно увеличиваются снизу вверх, к концу стержня.

Капиллярная постоянная.

Если открытую с обеих сторон цилиндрическую капиллярную трубку радиусом r опустить в сосуд с жидкостью, которая полностью смачивает стенки трубки, то жидкость в трубке поднимется на высоту h , которая определится из формулы (17.1)

$$h = \frac{2 \sigma}{r p g}, \quad (17.1)$$

где p - плотность жидкости;

g - ускорение свободного падения.

Если жидкость не смачивает стенки трубки, то уровень ее в трубке будет стоять ниже, чем в широком сосуде, на величину, определяемую по формуле (17.2).

Величина $h \cdot r = \frac{2\sigma}{pg}$ - не зависит от радиуса капилляра и определяется молекулярной природой жидкости, в связи с чем называется капиллярной постоянной. Капиллярная постоянная измеряется в квадратных миллиметрах и численно равна высоте капиллярного поднятия в полностью смачиваемой трубке радиусом 1 мм.

В ареометрии принято называть капиллярной постоянной величину $\frac{h \cdot r}{2}$ условно обозначаемую буквой a , которая вычисляется по формуле (17.2)

$$a = \frac{\sigma}{\rho g}, \quad (17.2)$$

Для получения капиллярной постоянной, выраженной в квадратных миллиметрах, необходимо умножить на 100 значение, найденное по формуле (17.2), где σ выражено в дин/см, p - в г/см³, g - в см/с².

Капиллярная постоянная с повышением температуры уменьшается; исключение составляют растворы глицерина в воде: при содержании глицерина свыше 60 % капиллярная постоянная растет по мере нагревания раствора.

Рассмотренные выше капиллярные явления приобретают особенное значение при ареометрических измерениях. Вокруг стержня ареометра,

плавающего в жидкости, поверхность искривляется и образуется вогнутый мениск (искривление поверхности в месте прикосновения со стержнем ареометра с жидкостью), так как большинство жидкостей смачивает стекло. Мениск как бы прилипает к стержню ареометра, увеличивая его массу, отчего ареометр погружается в жидкость на большую глубину; здесь и далее объем жидкости между мениском и горизонтальной плоскостью, касательной к нему, условно именуется мениском.

Мениск, представляющий собой некоторое количество жидкости, поднявшейся вдоль стержня ареометра, удерживается силой поверхностного натяжения, которое действует на линии соприкосновения жидкости со стержнем.

В случае полного смачивания стержня ареометра жидкостью сила поверхностного натяжения направлена вдоль стержня и равна произведению поверхностного натяжения σ на длину окружности стержня, т.е. $\pi \cdot d \cdot \sigma$, где d - диаметр стержня. Обозначая массу мениска через m , получаем следующее уравнение равновесия (17.3)

$$mg = \pi d \sigma , \quad (17.3)$$

После подстановки значения σ из формулы (17.2) находим выражение для определения массы мениска, т.е. получаем формулу (17.4)

$$m = \pi d a \rho , \quad (17.4)$$

Хотя масса мениска сравнительно с массой ареометра весьма мала, подсчитаем, насколько погрузится ареометр под действием мениска.

Ареометр находится в равновесии в жидкости, когда его вес равен весу вытесненной жидкости; следовательно, вес жидкости в объеме той части стержня, которая погрузилась под действием мениска, равен весу мениска.

Обозначим через h_0 , величину этой части стержня, запишем указанное условие в виде (17.5)

$$mg = \frac{\pi d^2}{\Delta} h_0 \rho g , \quad (17.5)$$

откуда искомая глубина погружения ареометра будет вычисляться по формуле (17.6)

$$h_0 = \frac{4 m}{\pi d^2 \rho} , \quad (17.6)$$

Как видим, под действием мениска ареометр погружается довольно значительно, так что влиянием мениска нельзя пренебречь.

Формулу (17.6) можно представить и в другом виде, если в нее подставить значение m из уравнения (17.4). Тогда получим формулу (17.7)

$$h_0 = \frac{4a}{d}, \quad (17.7)$$

Формула (17.7) подтверждает, что в двух жидкостях, имеющих одинаковую плотность, но различную капиллярную постоянную, один и тот же ареометр даст разные показания. Если a_1 и a_2 - капиллярные постоянные жидкостей и $a_1 > a_2$, то глубина погружения ареометра под действием мениска в первой жидкости будет больше, чем во второй, причем разность глубин согласно формуле (17.7) составит $\frac{4}{d} * (d_1 - d_2)$.

Таким образом, глубина погружения ареометра прямо пропорциональна капиллярной постоянной жидкости и обратно пропорциональна диаметру стержня ареометра. Отсюда следует, что в жидкости с большей капиллярной постоянной из-за большего погружения ареометр будет показывать меньшую, чем следует, плотность, так как значения плотности на шкале ареометра растут сверху вниз.

Уравнение равновесия ареометра в жидкости.

Рассмотрим силы, действующие на ареометр, плавающий в жидкости, и выведем уравнение равновесия ареометра, устанавливающее зависимость между основными размерами ареометра и плотностью жидкости.

Введем следующие обозначения:

- ρ - плотность жидкости;
- a - капиллярная постоянная жидкости;
- ν_0 - объем всего ареометра;
- ν - объем корпуса ареометра и части стержня до нижнего штриха шкалы;
- l - расстояние от нижнего штриха шкалы до уровня жидкости;
- s - площадь поперечного сечения стержня;
- L - длина окружности сечения стержня;
- m - масса ареометра;
- D - плотность воздуха;
- g - ускорение свободного падения.

Для равновесия ареометра в жидкости необходимо, чтобы существовало равенство между силами, погружающими ареометр в жидкость, и силами, выталкивающими его из жидкости.

Допустим, что жидкость имеет ту температуру, для которой градуирован ареометр. Силы, погружающие ареометр в жидкость, складываются из веса ареометра $G_a = m * g$ и веса мениска $G_M = L * a * \rho * g$ (рисунок 17.3).

Выталкивающая сила равна сумме следующих трех сил: веса жидкости в объеме погруженной части ареометра $P_a = (\nu + l \cdot s) \cdot \rho \cdot g$; веса воздуха в объеме непогруженной части стержня $P_c = (\nu_0 - \nu - l \cdot s) \cdot D \cdot g$; веса воздуха в объеме мениска [последний определяется делением массы мениска, на плотность жидкости] $P_m = L \cdot a \cdot D \cdot g$.

Условие равновесия ареометра можно выразить в виде (17.8)

$$(m + l \cdot a \cdot \rho) \cdot g = [(\sigma + l \cdot s) \cdot \rho + (\sigma_0 - \sigma - l \cdot s) \cdot D + L \cdot a \cdot D] \cdot g ,$$

или

(17.8)

$$m - \sigma_0 \cdot D + L \cdot a \cdot (\rho - D) = (\sigma + l \cdot s) \cdot (\rho - D),$$

Принимая во внимание, что разность $m - \sigma_0 \cdot D$ представляет собой массу ареометра за вычетом массы воздуха в объеме ареометра, т.е. массу ареометра M , определенную взвешиванием в воздухе, получим следующее окончательное уравнение (17.9)

$$M + L \cdot a \cdot (\rho - D) = (\sigma + l \cdot s) \cdot (\rho - D), \quad (17.9)$$

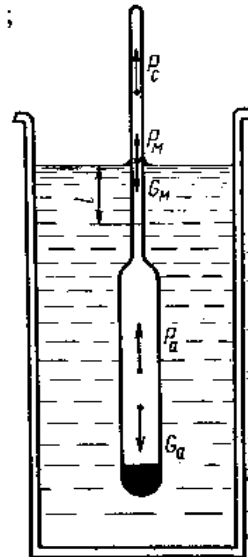


Рисунок 17.3 - Силы, действующие на ареометр

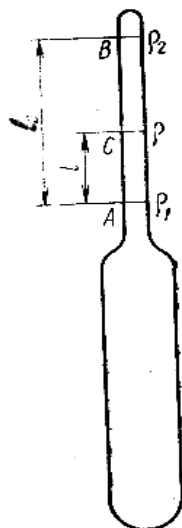


Рисунок 17.4 - Схема к расчету шкалы ареометра

Основы конструирования ареометра

При конструировании ареометра необходимо придать ему такую форму и такие размеры, чтобы обеспечивалось его устойчивое равновесие при плавании в жидкости. Для этого должны быть соблюдены следующие условия:

- 1) центр тяжести ареометра и точка приложения выталкивающей силы, совпадающая с центром тяжести объема жидкости, вытесненной ареометром, должны лежать на одной вертикальной прямой;
- 2) центр тяжести ареометра должен находиться ниже точки приложения выталкивающей силы.

Для выполнения первого условия ареометру придают форму, симметричную относительно вертикальной оси. Для соблюдения второго условия нижнюю часть корпуса ареометра заполняют балластом.

У ареометра со шкалой, охватывающей большой интервал плотностей, если его корпус выполнить цилиндрическим (рисунок 17.1 а), центр тяжести будет расположен близко к центру тяжести вытесненной жидкости, т.е. равновесие ареометра будет неустойчивым. Так как в этом случае невозможно опустить центр тяжести ареометра еще ниже, приходится поднять центр тяжести вытесненной жидкости, для чего корпусу придают веретенообразную форму (рисунок 17.1 б).

Пользование рабочими ареометрами

Перед определением плотности жидкости или концентрации раствора необходимо, прежде всего, выбрать тип ареометра и его пределы измерений, руководствуясь при этом данными, указанными в паспорте на испытуемую жидкость, а также требуемой точностью измерения.

При выборе ареометра следует иметь в виду, что в паспорте на жидкость указывается ее плотность (концентрация) при нормальной температуре, в то

время как в большинстве случаев приходится измерения выполнять при иной температуре, и необходимо хотя бы ориентировочно знать плотность (концентрацию) именно при этой температуре, чтобы можно было правильно выбрать пределы измерений прибора.

Испытуемую жидкость наливают в стеклянный цилиндр (ГОСТ 9545-60), внутренний диаметр которого превышает диаметр корпуса ареометра не менее чем вдвое, а высота несколько превышает длину ареометра. Если жидкость непрозрачна, можно применять металлический цилиндр; при этом после погружения ареометра в жидкость ее уровень должен находиться у верхнего края цилиндра.

Цилиндр перед заполнением жидкостью промывают теплой водой, насухо вытирают чистым полотенцем и споласкивают испытуемой жидкостью.

Для того, чтобы жидкость не вспенивалась при заполнении цилиндра, струю жидкости направляют на стенки цилиндра, а не на дно, или же наливают жидкость по стеклянной палочке. Если пена все же образовалась, ее необходимо удалить фильтровальной бумагой. Для удаления пены маловязкой жидкости часто оказывается достаточным хлопнуть ладонью по верху цилиндра.

При измерении плотности (концентрации) жидкости для анализа ее качества жидкость предварительно выдерживают в помещении до тех пор, пока отклонение температуры жидкости от температуры окружающего воздуха составит не более ± 3 °С.

Непосредственно перед погружением ареометра жидкость в цилиндре тщательно перемешивают стеклянной или металлической мешалкой, длина которой превышает высоту цилиндра. Стеклянная мешалка изготавливается из стеклянного прутка, конец которого загнут в плоскую спираль под прямым углом к прутку. Металлическая мешалка представляет собой круглую или серповидную пластинку, припаянную перпендикулярно к стержню. Мешалку следует 5-7 раз переместить вверх и вниз по всей высоте столба жидкости, не вынимая из жидкости, чтобы в нее не попадал воздух. Если в жидкости все же появились пузырьки воздуха, то к измерению можно приступать лишь после того, как они удалены.

Затем, взявшись двумя пальцами за верхний конец стержня, чистый сухой ареометр медленно и осторожно погружают (вертикально) в жидкость так, чтобы он не задевал стенок цилиндра. После того как ареометр погрузится в жидкость настолько, что штрих шкалы, соответствующий ожидаемой плотности (концентрации), окажется на 3-5 мм выше уровня жидкости, ареометр перестают держать и дают ему возможность свободно опуститься под действием собственного веса; это необходимо для образования правильного мениска. Если ареометр отпустить преждевременно, то он начнет быстро погружаться в жидкость, может удариться о дно цилиндра и разбиться. Кроме того, вследствие глубокого погружения, вызванного движением ареометра по инерции, жидкость смочит стержень намного выше штриха, соответствующего ее плотности (концентрации) и показание прибора будет неправильным.

Погруженный в жидкость ареометр должен плавать вертикально и свободно, не соприкасаясь со стенками цилиндра

Ареометр следует выдержать в жидкости 3-4 мин, чтобы уравнились их температуры. После полного успокоения ареометра снимают отсчет показания по шкале.

17.1.2 Ротаметры. Общие сведения о ротаметрах /32/

Ротаметры относятся к группе расходомеров постоянного перепада давления. Их действие основано на изменении проходного сечения потока и высоты положения чувствительного элемента (поплавка, клапана) в зависимости от расхода протекающей среды. Чувствительный элемент находится в состоянии витания под действием гидродинамического напора и силы тяжести, при этом перепад давления по обе стороны элемента остается постоянным. Ротаметры широко распространены во многих отраслях промышленности благодаря их преимуществам: простоте конструкции, отсутствию трущихся деталей, надежности действия, возможности изготовления деталей из материалов, устойчивых к агрессивным средам, высокой чувствительности, постоянству относительной погрешности на всем диапазоне шкалы, сравнительно широкому диапазону измерений (1:5, 1:6). Ротаметры составляют около 10 % всех расходомеров для напорных потоков. По конструктивному исполнению ротаметры подразделяют на стеклянные с местным отсчетом (РМ) и металлические с электрическим (РЭ) или пневматическим (РП) выходным сигналом.

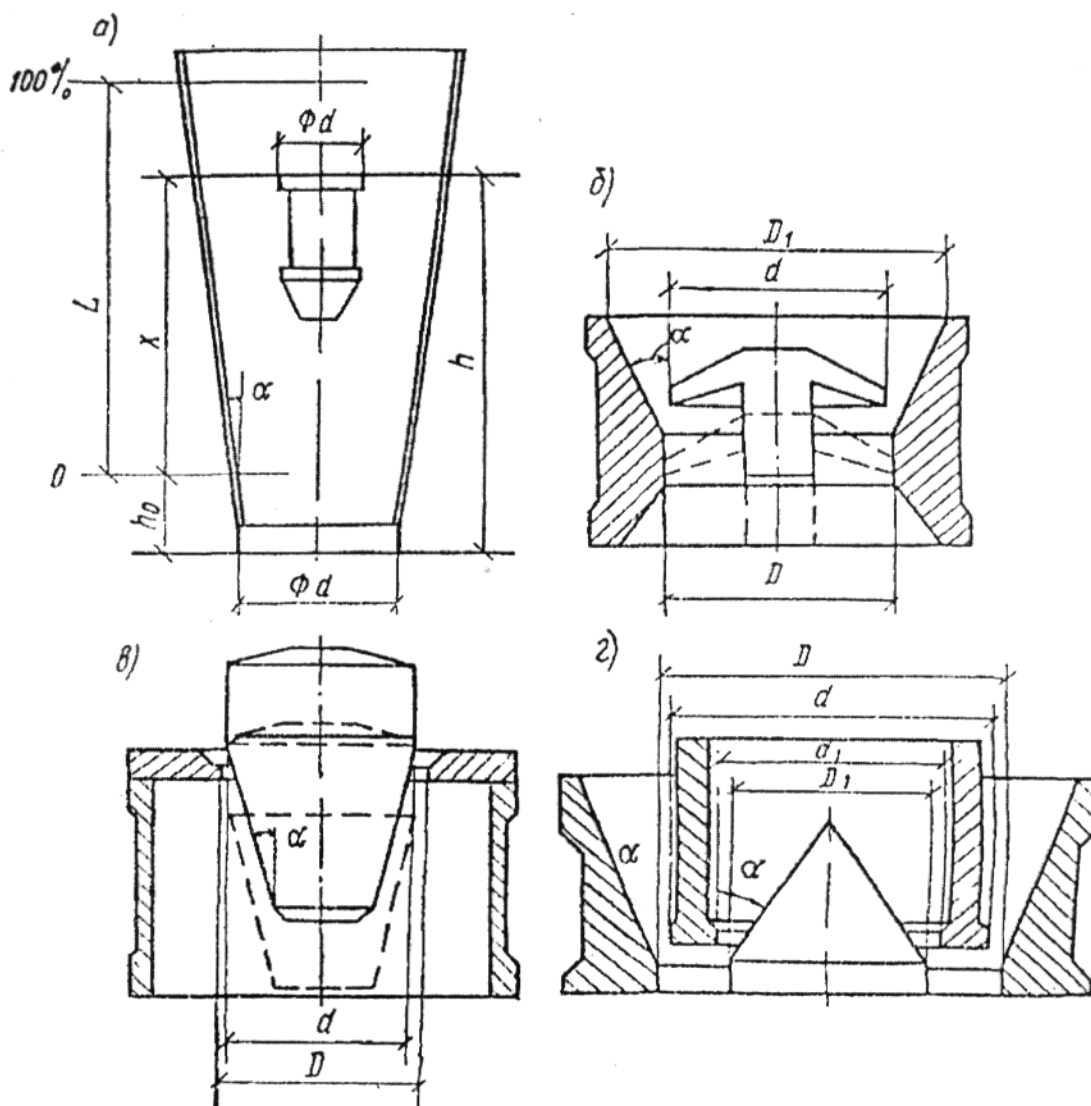
Основной измерительной частью ротаметров является ротаметрическая пара (поплавок - коническая трубка, поплавок - седло и т. п.). Различают три типа ротаметрических пар (рисунок 17.5).

Ротаметрическая пара первого типа состоит из измерительного конуса и поплавка. Такая конструкция применяется в стеклянных (рисунок 17.5 а) и металлических (рисунок 17.5 б) ротаметрах. Пара второго типа (рисунок 17.5 в) состоит из диафрагмы и поплавка. Такую пару применяют в металлических ротаметрах, например РЭ. Ротаметрическая пара третьего типа (рисунок 17.5 г) имеет поплавок кольцевой формы, размещенный в зазоре между внешним и внутренним конусами. Такие пары применяют в металлических ротаметрах для измерения больших (до 100 м³/ч) расходов жидкости.

Некоторые авторы, классифицируя расходомеры постоянного перепада давления, относят к ротаметрам только приборы с ротаметрической парой первого типа, а приборы с парами второго и третьего типов относят к поплавковым расходомерам. Такое деление представляется искусственным, так как принцип действия приборов один и тот же. В каталогах промышленной продукции все перечисленные модификации расходомеров называют ротаметрами.

В технической литературе, посвященной ротаметрам, приняты следующие основные термины: теоретический нуль ротаметра положение поплавка ротаметра, соответствующее нулевому расходу, Это несколько

условное понятие. Например, для ротаметров со стеклянной трубкой теоретический нуль - это такое положение поплавка, когда он перекрывает мысленно продолженный конус трубки; высота подъема поплавка h (см. рисунок 17.5 а) - расстояние от теоретического нуля до миделевого сечения поплавка; ход поплавка x - перемещение поплавка от нулевой отметки шкалы до рабочего положения поплавка при данном расходе (для ротаметров типа РМ) или от нижнего упора до рабочего положения (для металлических ротаметров); поправка на высоту подъема поплавка $h_0 = h - x$ (см. рисунок 17.5 а).



а - пара первого типа в стеклянных ротаметрах; *б* - то же, в металлических; *в* - пара второго типа; *г*—пара третьего типа

Рисунок 17.5 - Схемы ротаметрических пар

Теоретические основы измерения расхода при помощи ротаметров

Уравнение движения поплавка в ротаметре выводится из условий его обтекания потоком жидкости или газа. Предполагается, что поток одномерный, начало координат помещается в плоскости теоретического нуля ротаметра, расход жидкости постоянен.

Применительно к ротаметрической паре первого (основного) типа можно утверждать, что на поплавки действуют:

Сила тяжести (17.10)

$$G = gW(\rho - \rho_i) = g(m - W\rho_i), \quad (17.10)$$

где W - объем поплавка;

ρ, ρ_i - плотность жидкости и материала поплавка соответственно;

m - масса поплавка;

Сила гидродинамического напора (17.11)

$$P = C_x \frac{\rho_i (\nu - \nu_x)^2}{2} \frac{\pi d^2}{4}, \quad (17.11)$$

где ν - средняя скорость потока в кольцевом зазоре;

ν_x - скорость поплавка относительно неподвижной трубки (начала отсчета);

C_x - коэффициент сопротивления поплавка.

Средняя скорость в кольцевом зазоре вычисляют по (17.12)

$$\nu = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{\left[\pi (d x \operatorname{tg} \alpha + x^2 \operatorname{tg}^2 \alpha) \right]}, \quad (17.12)$$

где ω - площадь кольцевого зазора.

При установившемся режиме $x = h$, а $P - G = 0$. Тогда получим формулу (17.13)

$$C_x = \frac{\rho_i d^2 Q^2}{8\pi (h d \operatorname{tg} \alpha + h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha)^2}, \quad (17.13)$$

Путем преобразований из уравнения (17.13) можно получить формулу (17.14) для вычисления расхода

$$Q = \frac{d h \operatorname{tg} \alpha + h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{d \sqrt{\frac{8 \pi g}{C_x \rho_i}}}, \quad (17.14)$$

Формула расхода для расходомеров с ротаметрической парой второго типа имеет вид (17.15)

$$Q = \frac{d h \operatorname{tg} \alpha - h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{d \sqrt{\frac{8 \pi g}{C_x \rho_i}}}, \quad (17.15)$$

а с ротаметрической парой третьего типа – (17.16)

$$Q = \frac{d h \operatorname{tg} \alpha (1 + K_1 K_2) + h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha (1 - K_2^2)}{d \sqrt{1 - K_1^2}} \sqrt{\frac{8 \pi G}{C_x \rho_i}}, \quad (17.16)$$

Теория ротаметров основана и на зависимостях, описывающих движение жидкости или газа в кольцевом зазоре между трубкой и поплавком. Перепад давления до и после поплавка находят из (17.17)

$$\Delta P = \frac{G}{F_M} = \frac{4 G}{\pi d^2}, \quad (17.17)$$

Расход через кольцевой зазор можно определить по формуле (17.18)

$$Q = \alpha_p \omega_K \sqrt{2 \Delta P / \rho}, \quad (17.18)$$

где α_p - коэффициент расхода ротаметра;

ω_K - площадь сечения кольцевого зазора.

Подставляя в формулу (17.18) значения перепада давления и площади кольцевого зазора, получим уравнение расхода (17.19)

$$Q = \alpha_p (d h \operatorname{tg} \alpha + h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha) / d \sqrt{8 \pi G / \rho}, \quad (17.19)$$

Из сравнения формул (17.14) и (17.19) следует (17.20)

$$\alpha_p = \sqrt{1 / C_x}, \quad (17.20)$$

Таким образом, можно установить связь между приведенными выше двумя теоретическими основами движения жидкости и поплавка в ротаметре.

Градуировочные характеристики ротаметров и способы их пересчета.

Ротаметры относятся к расходомерам, требующим их обязательной градуировки на образцовой расходомерной установке, так как явления, возникающие в ротаметрах при протекании измеряемой среды, сложны и не могут быть исчерпывающе описаны математическими зависимостями. Кроме того, малейшее отклонение размеров рабочих органов ротаметров от заданных приводит к изменению зависимости подъема поплавка от расхода измеряемой среды.

При изготовлении на заводах ротаметры обычно градуируют на воде или воздухе при стандартных условиях ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, атмосферное давление 760 мм рт. ст.). На практике ротаметрами измеряют расход жидкостей или газов со свойствами, отличающимися от свойств воды или воздуха, а также при иных температурах и давлениях. Для получения при этом значений расхода с заданной погрешностью необходимо либо повторить градуировку на измеряемой среде, что часто бывает сложно, а иногда и невозможно (например, при измерении расхода токсичных сред), либо провести градуировку на средах-заменителях, имитирующих вязкость и плотность измеряемой среды. Имитирующими жидкостями могут служить водоглицериновые смеси, масла и т. п. Но применение имитирующих жидкостей не всегда возможно, так как подобрать идентичную по плотности и вязкости среду бывает трудно, а отличие в этих параметрах приводит к дополнительной погрешности. Поэтому для получения показаний ротаметров на различных средах часто прибегают к пересчету заводских градуировочных характеристик. Существует несколько методов пересчета градуировочных характеристик. Нормативным документом по пересчету показаний ротаметров являются «Методические указания по пересчету градуировочных характеристик расходомеров постоянного перепада давления» (МУ 44-75). Кроме того, имеется ряд работ в этой области.

Все современные методики пересчета градуировочных характеристик ротаметров основаны на законах гидродинамического подобия и использования ряда безразмерных параметров, к которым относятся. $\pi_1 = Q / dv$ - параметр, аналогичный числу Рейнольдса, устанавливающий подобие сил жидкостного трения и сил инерции (d - диаметр поплавка в миделевом сечении); $\pi_2 = v^2 \rho / G$ - параметр, характерный для расходомеров постоянного перепада и устанавливающий подобие сил трения и сил тяжести; $\pi_3 = D_g / d = 2htg\alpha / d$ - безразмерная высота, устанавливающая геометрическое и гидравлическое подобие (D_g гидравлический диаметр); $\pi_4 = Q / d * \sqrt{p / G}$ параметр, аналогичный числу Эйлера и характеризующий подобие сил давления и сил инерции.

Из сопоставления основных формул расхода для ротаметров с поплавками одинаковой плотности, измеряющих среды с различной плотностью, можно получить формулу (17.21) для пересчета расхода

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{C_{x_1}(\rho - \rho_2)\rho_1}{C_{x_2}(\rho - \rho_1)\rho_2}}, \quad (17.21)$$

где C_{x1} , C_{x2} - соответственно коэффициенты сопротивления поплавка при градуировке и в реальных условиях измерения;

ρ — плотность поплавка;

ρ_1 — плотность градуировочной жидкости или газа;

ρ_2 — плотность измеряемой среды.

Значения коэффициентов C_{x1} и C_{x2} можно определить из специально составленных таблиц или вычислить по формулам (17.22) и (17.23), используя безразмерные параметры.

Для ротаметрической пары первого типа

$$C_x = \pi / 2 P_3^2 (2 + P_3)^2 P_1^{-2} P_2^{-1}, \quad (17.22)$$

для второго типа

$$C_x = \pi / 2 P_3^2 (2 - P_3)^2 P_1^{-2} P_2^{-1}, \quad (17.23)$$

Использовать аналитические зависимости при пересчете градуировочных характеристик ротаметров сложно, поэтому были предложены графоаналитические методы, упрощающие процесс пересчета. Одним из распространенных методов является метод, основанный на использовании теории размерностей зависимости

$$h = f(Q, \rho, v, d_p, G_p), \quad (17.24)$$

По результатам градуировки геометрически подобных ротаметров (на различных средах) строят номограмму, которая представляет собой семейство кривых $\lg \pi_1 = f(\lg \pi_2, h, d^{-1})$.

Пример такой номограммы показан на рисунке 17.6. При ее использовании сначала вычисляют безразмерные величины P_2 , $h d^{-1}$, а затем по номограмме находят величину P .

Объемный расход рабочей жидкости вычисляют по формуле (17.25)

$$Q = P_1 d v, \quad (17.25)$$

Недостатком этого метода является то, что в его основу положено постоянство угла конусности, т. е. предполагается высокоточное изготовление трубок ротаметров. На практике это трудно осуществимо, а различие в углах конусности приводит к погрешностям при пересчете.

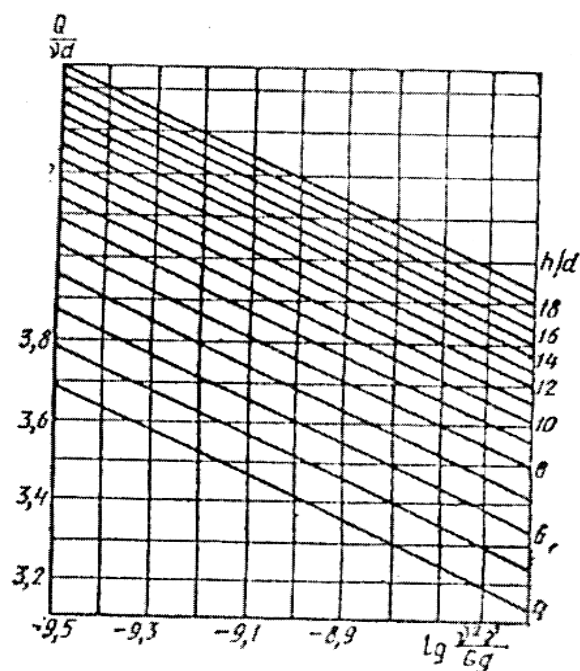


Рисунок 17.6 - Номограмма для пересчета показаний ротаметров

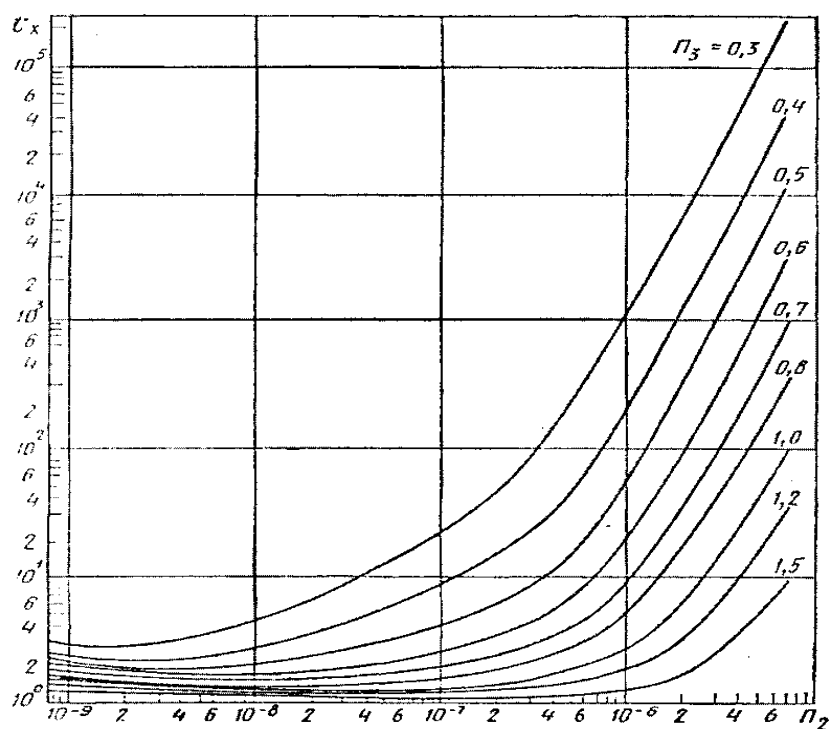


Рисунок 17.7 - Номограмма для определения коэффициента C_x по безразмерным величинам Π_2 и Π_3 .

Для определения коэффициентов сопротивления поплавков общепромышленных ротаметров построен график (рисунок 17.7). График дает возможность определить C_x в зависимости от параметров Π_2 и Π_3 .

Как видно из соотношений (17.21) ÷ (17.23), проводить по ним пересчет достаточно сложно и не всегда доступно в практических условиях. Иногда встречаются случаи, в которых вязкость рабочей и градуировочной жидкостей практически одинакова, а плотность их различна. В этих случаях пересчет можно вести по формуле (17.26)

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{[(\rho - \rho_2)\rho_1][(\rho - \rho_1)\rho_2]}, \quad (17.26)$$

При измерении расхода газа, когда плотность поплавка ρ значительно больше плотности газа, можно пользоваться приближенной пересчетной формулой (17.27)

$$Q_2 = Q_1 [1 - (\rho_2 - \rho_1) / 2\rho_1], \quad (17.27)$$

При этом погрешность пересчета составит, %

$$\delta = 37,5 [(\rho_2 - \rho_1)^2 / \rho_1^2], \quad (17.28)$$

Более точно

$$Q_2 = Q_1 [1 - (\rho_2 - \rho_1) / 2\rho_1 + 3(\rho_2 - \rho_1)^2 / 8\rho_1^2], \quad (17.29)$$

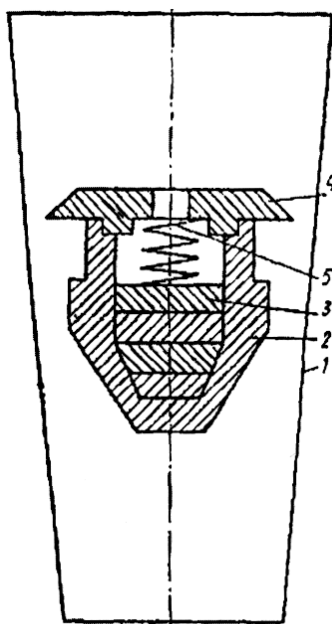
погрешность при этом составит

$$\delta = 31,25 [(\rho_2 - \rho_1)^3 / \rho_1^3], \quad (17.30)$$

Для использования газовых ротаметров, градуированных на воздухе, для измерения других газов применяют способ изменения массы поплавка. Массу нового поплавка вычисляют по формуле (17.31)

$$m_2 = \frac{(m_1 - \rho_1 V) v_2^2 \rho_2}{v^2 \rho_1} + \rho_2 V, \quad (17.31)$$

где V – объем



1 - трубка ротаметра; 2 – корпус поплавка; 3 – сменные грузики; 4 – крышка; 5 – пружинка.

Рисунок 17.8 - Схема поплавка переменной массы

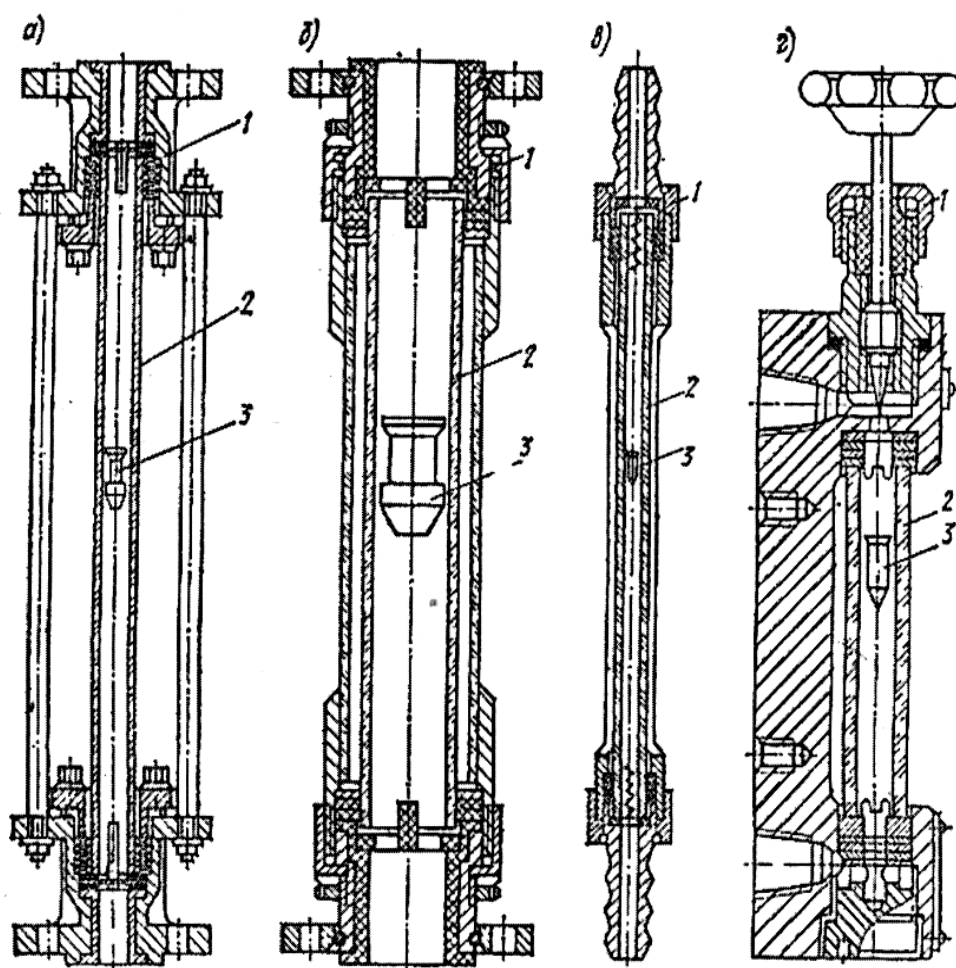
При использовании той же шкалы ротаметра расход новой среды (газа) вычисляют по соотношению (17.32)

$$Q_2 = Q_1 (\nu_2 / \nu_1), \quad (17.32)$$

Конструктивно поплавки переменной массы можно изготовить по схеме, представленной на рисунке (17.8).

Конструкции ротаметров

В России выпускают общепромышленные ротаметры типов РМ, РЭ и РП. Ротаметры типа РМ со стеклянной трубкой (рисунок 17.9) заменяют ранее выпускавшиеся типа РС.



а — ротаметр с фланцевыми присоединениями; *б* — ротаметр с защитной трубкой; *в* — ротаметр со штуцерами для шлангов; *г* — ротаметр РС-ЗА; 1 — корпус; 2 — трубка; 3 — поплавок

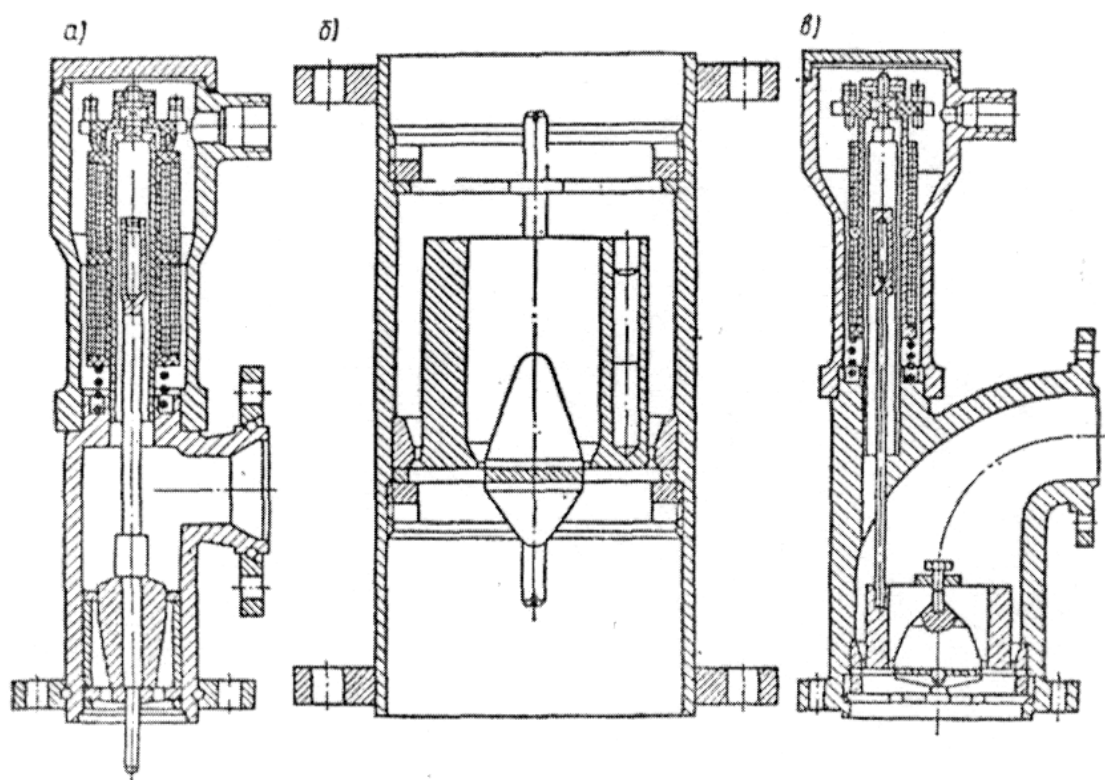
Рисунок 17.9 - Ротаметры со стеклянной измерительной трубкой

Их выпускают по ГОСТ 13045 -81. Технические характеристики таких приборов приведены в таблице 17.2.

Поплавков у ротаметров типа РМ в зависимости от пределов измерения изготавливают из стали 12Х18Н9Т, анодированного дюралюминия, эбонита или титана. Ротаметры этого типа могут работать при температуре измеряемой среды и окружающей атмосферы в пределах от 278 до 323 К. Ротаметры со стеклянной трубкой находят широкое применение в научных исследованиях, а также в промышленности для измерения небольших расходов жидкости и газа. Основная приведенная погрешность их должна составлять не более —2,5 %.

Таблица 17.2 - Технические характеристики стеклянных ротаметров типа РМ

Шифр базовой модели параметра	Диаметр условного прохода	Для жидкости		Для газа	
		Обозначение ротаметра	Верхний предел измерений (по воде), м ³ /ч	Шифр прибора	Верхний предел измерений (по воздуху), м ³ /ч
НМ-1	3	РМ-0.0025ЖУЗ РМ-0.004ЖУЗ РМ-0.0063ЖУЗ РМ-0.01ЖУЗ	0,0025 0,004 0,0063 0,01	РМ-0.04ГУЗ РМ-0.063ГУЗ РМ-0.1ГУЗ РМ-0.16ГУЗ	0,04 0,063 0,1 0,16
РМ-А-1	3	РМ-А0.0025ЖУЗ РМ-А0.0040ЖУЗ РМ-А0.0068ЖУЗ	0,0025 0,004 0,0063	РМ-А-0.063ГУЗ РМ-А-0.1ГУЗ РМ-А-0.16ГУЗ	0,063 0.1 0,16
РМ-П	6	РМ-0.016ЖУЗ РМ-0.025ЖУЗ РМ-0.04ЖУЗ	0,016 0,025 0,04	РМ-А-0.25ГУЗ РМ-0.25ГУЗ РМ-0.4ГУЗ	0,25 0,25 0,4
РМ-П1	10	РМ-0.063ЖУЗ РМ-0.1ЖУЗ	0,063 0,1	РМ-0.63ГУЗ РМ-1ГУЗ	0,63 1
РМ-1У	15	РМ-0,16ЖУЗ РМ-0.25ЖУЗ РМ-0.4ЖУЗ	0,16 0,25 0,4	РМ-1.6ГУЗ РМ-2.5ГУЗ РМ-4ГУЗ	1,6 2,5 4
РМ-У	25	РМ-0.63ЖУЗ РМ-1ЖУЗ РМ-1.6ЖУЗ	1 0,63 1,6	РМ-6.3ГУЗ РМ-10ГУЗ РМ-16	6,3 10 16
РМ-У1	40	РМ-2.5ЖУЗ РМ-4ЖУЗ	2,5 4	РМ-25ГУЗ РМ-40ГУЗ	25 40



а — для малых расходов; *б, в* — для больших и средних расходов

Рисунок 17.10 - Металлические ротаметры РЭ

В таблице 17.3 дано сопоставление типоразмеров ротаметров со стеклянной трубкой с выпускавшимися ранее приборами этого типа. Ротаметры типа РЭ с дистанционной электрической передачей показаний состоят из двух основных частей ротаметрической и электрической (рисунок 17.10).

Ротаметрическая часть представляет собой корпус с поплавком конической или грибообразной формы, с подвижной осью, перемещающейся внутри конической трубки, электрическая - из индукционной катушки с сердечником, расположенным на оси поплавка.

Катушка включена в дифференциально-трансформаторную систему вторичного прибора. Электрическая часть защищена от попадания в нее измеряемой среды разделительной трубкой, а снаружи - кожухом. Температура измеряемой среды может быть в пределах от 233 до 343 К, а температура окружающей атмосферы - от 243 до 322 К. Ротаметры РЭ могут изготавливаться в пылебрызгозащищенном или взрывозащищенном исполнении категории ВЗГ.

Таблица 17.3 - Сопоставительные данные ротаметров со стеклянной трубкой

Условные обозначения выпускавшихся ротаметров		Условные обозначения ранее выпускавшихся ротаметров
Базовые модели	Обозначение ротаметра	
1	2	3
РМ-1	РМ-0.0025ЖУЗ РМ-0.01ЖУЗ	-
РМ-1-А	РМ-А-0.0025ЖУЗ РМ-А-0,0063ЖУЗ	РС-3А -
РМ-П	РМ-0.016ЖУЗ РМ-0.04ЖУЗ	РС-3, РСС-3 -
РМ-Ш	РМ-0.1ЖУЗ	РС-5, РСС-5
РМ-IV	РМ-0.16ЖУЗ РМ-0.4ЖУЗ	РС-5, РСС-5 -
РМ-V	РМ-1ЖУЗ	РС-7, РСС-7
РМ VI	РМ-1.6ЖУЗ РМ-2.5ЖУЗ	РС-7, РСС-7

Они поставляются в комплекте с вторичными приборами, как правило, КСДЗ, но могут быть укомплектованы и приборами КСД2, КВД1, ВМД. Нижний предел измерения ротаметров типа РЭ не более 0,2 от верхнего, основная приведенная погрешность 2,5 % . Основные параметры ротаметров типа РЭ приведены в таблице 17.4.

Ротаметры с процентной шкалой и унифицированным пневматическим выходным сигналом (0,02 ... 0,1 МПа) выпускают трех типов: РП (рисунок 17.11) с корпусом из нержавеющей стали, РПФ с корпусом, армированным фторопластом, и РПО паровым обогревом корпуса. Такие ротаметры выпускают на верхние пределы измерения от 0,1 до 25 м³/ч с условным диаметром 10 ... 100 мм. Связь поплавка с пневматической системой в ротаметрах типа РП осуществляется за счет сдвоенного магнита, установленного на подвижном плунжере поплавка, который через стенку корпуса управляет положением следящего магнита и связанной с ним заслонки.

Таблица 17.4 - Основные параметры ротаметров типов РЭ и РЭВ

Условные обозначения базовой модели	Диаметр условного прохода, мм	Обозначение ротаметра	Верхний предел измерения по воде, м ³ /ч	Рабочее давление, МПа	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
РЭ-1	6	РЭ-0.25ЖУЗ РЭ-0.04ЖУЗ	0.025 0,04	0,6; 1,6; 6,4	291*167*79	2,5
РЭ-II	10	РЭ-0.1ЖУЗ	0.1		420*171*112	8,5
	10	РЭ-0.063ЖУЗ	0.063			
	15	РЭ-0.16ЖУЗ	0,16			
	15	РЭ-0.25ЖУЗ	0,25			
РЭ-III	15	РЭ-0,4ЖУЗ	0,4	0,6; 1,6	465*198*136	11
	25	РЭ-0.63ЖУЗ	0,63			
	25	РЭ-1ЖУЗ	1			
	40	РЭ-1.6ЖУЗ	1,6			
	40	РЭ-2.5ЖУЗ	2,5			
РЭ-IV	40	РЭ-4ЖУЗ	4			
	70	РЭ-6.3ЖУЗ	6,3	0,6; 1,6	564*311*232	27
	70	РЭ-10ЖУЗ	10			
	100	РЭ-16ЖУЗ	16			
	100	РЭ-25ЖУЗ	25	0,6; 1,6	650*365*280	54
	150	РЭ-40ЖУЗ	40			
	150	РЭ-63ЖУЗ	63			

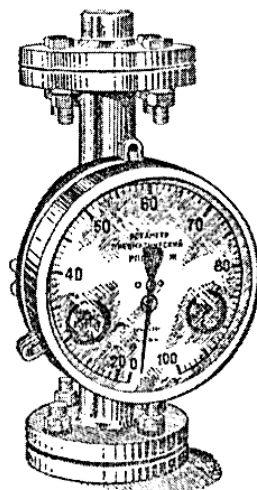
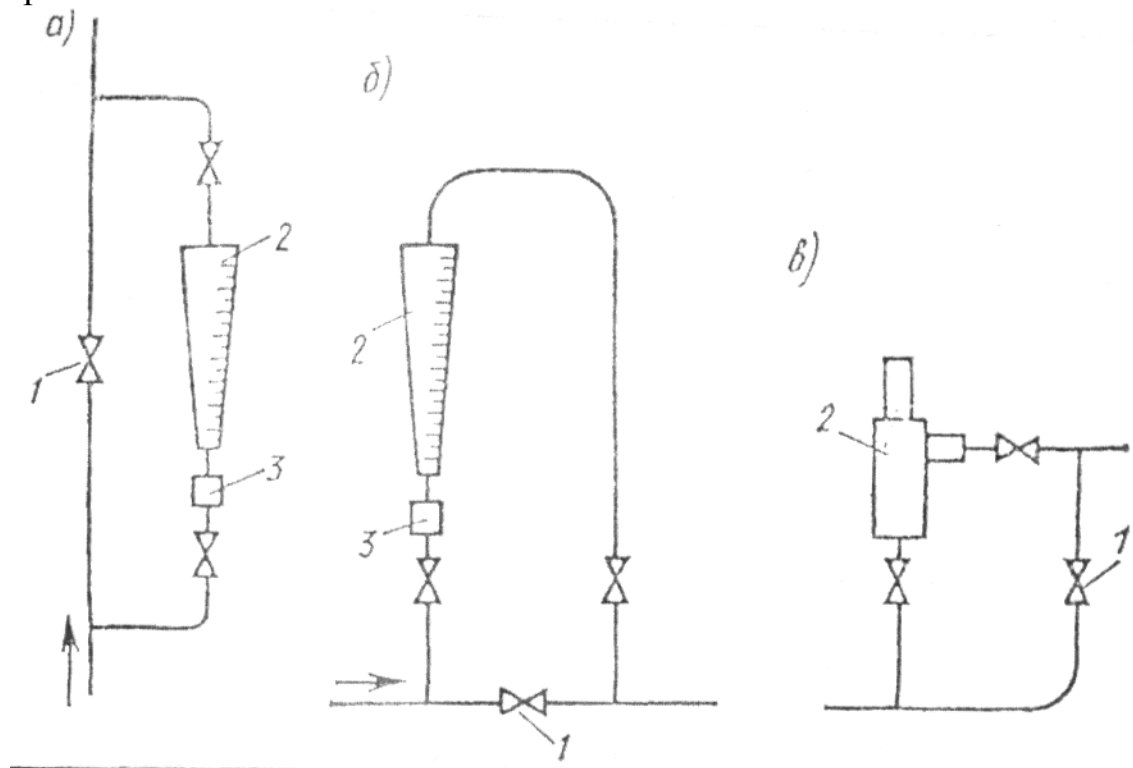


Рисунок 17.11 - Ротаметр с пневматическим выходным сигналом.

Внешний вид ротаметра РП показан на рисунке 17.11. Эти приборы предназначены для применения во взрывоопасных производствах. Их технические характеристики близки к техническим характеристикам ротаметров РЭ.



а — стеклянного на вертикальном трубопроводе; *б* — то же, на горизонтальном трубопроводе; *в* — углового металлического.
1 — опломбированный вентиль; *2* - ротаметр; *3* — центрирующая вставка.

Рисунок 17.12 - Схемы установки ротаметров

Ротаметры, особенно со стеклянной трубкой, требуют точной установки по вертикали. Отклонение оси трубки от вертикали даже на $1 \dots 3^\circ$ приводит к существенным дополнительным погрешностям измерения расхода. Кроме того, ротаметры типов РМ (РС) не обладают достаточной механической прочностью и при неправильной установке стеклянная трубка может сломаться. На рисунке 17.12 показаны схемы установки ротаметров в системах промышленных трубопроводов.

К преимуществам ротаметров следует отнести сравнительно небольшие потери напора. Как правило, они не превышают 1 мм вод. ст. Потери напора в ротаметрах мало зависят от расхода: например, при изменении расхода в 5 раз потери напора увеличиваются всего в 1,5 ... 2 раза.

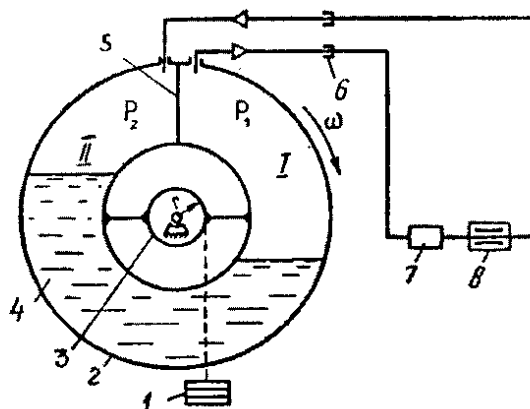
Погрешности измерения ротаметрами. Поверка ротаметров.

Среднюю квадратическую относительную погрешность измерения расхода при помощи ротаметра можно вычислить из соотношения (17.33)

$$\sigma_Q^2 = \sigma_\alpha^2 + 0,25 C_x^2 + \frac{0,25}{m^2} \sigma_m^2 + \frac{\rho^2}{4(\rho - \rho_i)^2} \sigma_{\rho_i}^2 + \frac{\rho^2}{3(\rho - \rho_1)^2} \sigma_\rho^2 + 0,25 \Pi_3 \sigma_d^2 + \sigma_h^2, \quad (17.33)$$

где $\sigma_\alpha, \sigma_{C_x}, \sigma_m, \sigma_{\rho_i}, \sigma_\rho, \sigma_d, \sigma_h$ - соответственно средние квадратические отклонения величин $\alpha, C_x, m, \rho_i, \rho, d$ и h от их номинального значения.

Пользование соотношением (17.33) затруднено, так как входящие в него величины определить бывает трудно, а подчас и невозможно, тем более что ротаметры обязательно подвергают градуировке и она по сути дает значение погрешности.



I — груз; 2 — кольцевой мерник; 3 — блок; 4 — жидкость гидрозатвора; 5 — перегородка; 6 — уплотнения; 7 — градуируемый ротаметр; 8 — регулятор; I и II — полости.

Рисунок 17.13 - Газовая расходомерная установка с вращающимся кольцевым мерником

Но по соотношению (17.33) можно определить влияние отклонения параметров измеряемой среды на погрешность. Кроме основной погрешности при измерении ротаметрами могут возникнуть дополнительные погрешности, главной из которых является погрешность от отклонения оси ротаметра от вертикали, которую вычисляют по формуле (17.34)

$$\delta_\gamma = (1 - \sqrt{\cos \gamma}) \cdot 100\%, \quad (17.34)$$

Поверку ротаметров проводят в соответствии с ГОСТ 8.122 – 99 «ГСИ. Ротаметры. Методы и средства поверки». Поверку жидкостных ротаметров проводят либо на специальных установках, либо на универсальных расходомерных поверочных стендах и установках. Поверку газовых ротаметров проводят на установках с образцовыми газовыми меринками. Схема одной из таких установок приведена на рисунке 17.13. Надо знать, что расходомерные

установки для поверки и градуировки ротаметров должны быть аттестованы органами государственной метрологической службы или ведомственными метрологическими службами.

17.1.3 Пикнометры /32/

Устройство пикнометров

Пикнометрический метод определения плотности жидкости основан на взвешивании жидкости, занимающей в пикнометре известный объем, найденный весовым способом.

В сравнении с гидростатическим взвешиванием пикнометрический метод определения плотности обладает рядом преимуществ. Основные достоинства данного метода сводятся к следующему:

- 1) высокая точность измерений (до $1 \cdot 10^{-5}$ г/см³), обусловленная тем, что взвешивают на высокоточных весах общего назначения без каких-либо дополнительных устройств, неизбежно уменьшающих чувствительность весов;
- 2) малая площадь свободной поверхности жидкости в пикнометре, что практически исключает испарение жидкости и поглощение влаги из воздуха;
- 3) пригодность для работы как с летучими, так и с весьма вязкими жидкостями;
- 4) возможность использования малого количества жидкости (1—100 см³);
- 5) раздельное проведение операций термостатирования жидкости в пикнометре и последующего взвешивания.

Поэтому при точных измерениях (например, при исследовательских работах), когда вполне оправданы некоторая трудоемкость и необходимость соблюдения ряда предосторожностей, пикнометрическому методу отдают предпочтение.

Существует много разновидностей пикнометров, и их применение определяется родом испытуемого вещества, его количеством, а также требуемой точностью измерений. Чем больше вместимость пикнометра, тем меньше погрешность взвешивания; однако одновременно увеличивается ошибка, связанная с неравномерностью температуры во всей массе жидкости. Наилучшие результаты получают с пикнометрами вместимостью 25—100 см³.

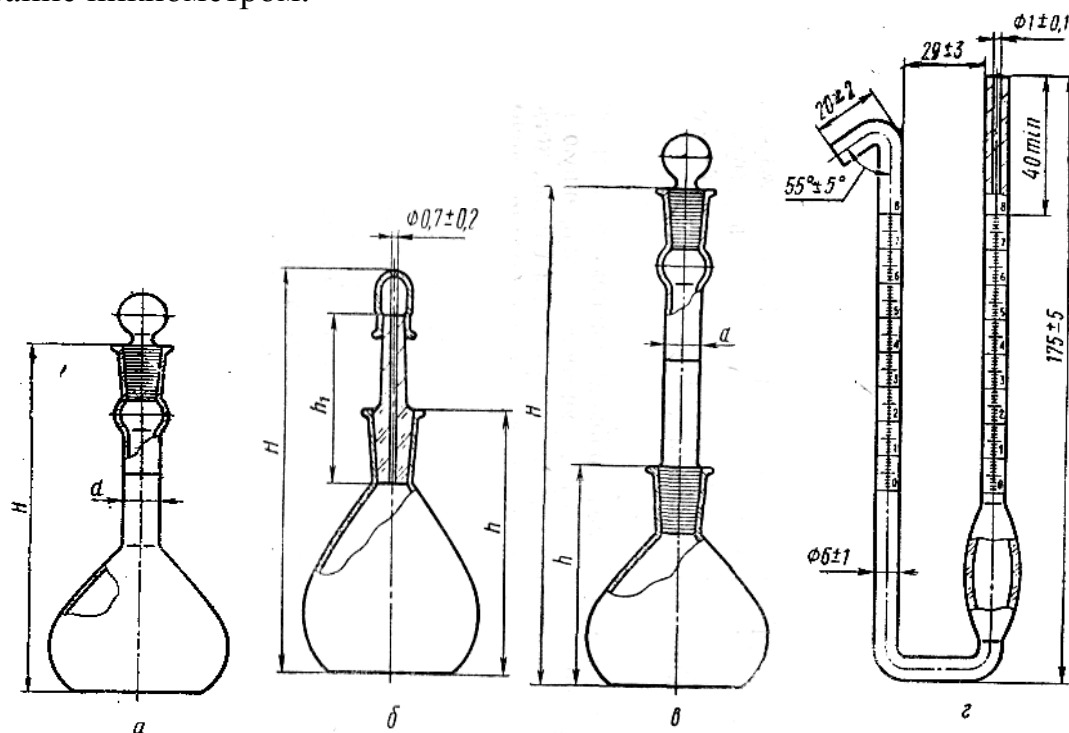
Наиболее распространены стеклянные колбообразные пикнометры шаровидной и цилиндрической формы, которые закрываются либо глухой притертой пробкой (эти пикнометры имеют круговую метку на горле – рисунок 17.14 а-в), либо притертой пробкой с капиллярным отверстием (рисунок 17.14 б). Основные размеры шаровидных пикнометров по ГОСТ 7465— 67.

Пикнометры с меткой, нанесенной на вставной горловине (рисунок 17.14 в), применяют для определения плотности твердых тел.

Метка на горле пикнометра соответствует его номинальной вместимости; до этой метки и заполняют пикнометр. Пикнометры с меткой, применяемые для жидкости (рисунок 17.14 а), могут иметь номинальную

вместимость 1; 2; 3; 5; 10; 50 и 100 см³, для твердых тел (рисунок 17.14 в) -10, 25 и 50 см³.

По требованию заказчика на расстоянии 1 мм выше и ниже основной метки наносят по одной дополнительной круговой метке, что упрощает пользование пикнометром.



а, б; в — колбообразные шаровидные; г- - У-образный

Рисунок 17.14 - Стекланные пикнометры.

Верхняя часть горла (под пробкой) пикнометра с меткой выполняется расширенной. В образующуюся расширенную полость входит часть жидкости в том случае, когда объем ее увеличивается в результате повышения температуры после заполнения пикнометра до метки.

Пикнометр с капиллярным отверстием в пробке обеспечивает более точные результаты измерений. Диаметр отверстия ($0,7 \pm 0,2$) мм. Вместимость такого пикнометра определяется верхним краем капиллярного отверстия.

Номинальная вместимость капиллярных пикнометров составляет 1; 2; 3; 5; 10; 25; 50 и 100 см³.

При измерении плотности сильно летучих жидкостей применяют П-образный капиллярный пикнометр, изображенный на рисунок 17.14 г. Согласно ГОСТ 7465—67 пикнометр представляет собой трубку с капиллярным отверстием диаметром от 0,9 до 1,0 мм. В правом колене имеется расширение. Конец левого колена отогнут. На обоих коленах нанесена равномерная шкала с 80 делениям (каждое деление - -1 мм). Номинальная вместимость П-образного пикнометра, определяемая по нижней его части между нулевыми отметкам составляет 0,5; 1 и 3 см³.

Весьма удобен в работе пикнометр (рисунок 17.15) с боковой капиллярной трубкой 3. Пробкой служит тело термометра 1, пришлифованного к горлу колбы 4. Термометр позволяет вести непрерывные наблюдения за температурой жидкости. Отверстие капилляра закрывается колпачком 2, притертым к конусному концу трубки.

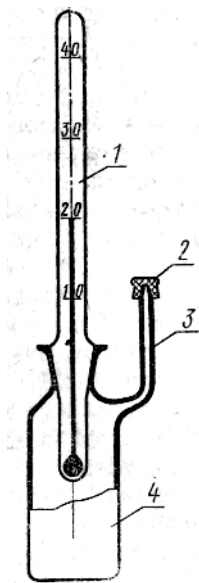


Рисунок 17.15 - Пикнометр с термометром.

Работа с пикнометром значительно упрощается, если на его горловине нанесена шкала, которая позволяет быстрее и точнее определять объем жидкости в пикнометре.

Для весьма малых количеств жидкости (порядка 1 см^3) хорошие результаты получают с помощью пипеткообразного пикнометра (пикнометра Оствальда - Шпренгеля). Он представляет собой U-образную трубку с оттянутыми и отогнутыми под прямым углом концами. Оба конца трубки закрыты притертыми колпачками. Пикнометр заполняют жидкостью до края отверстия на одном конце и до метки на другом конце.

Для измерения плотности газов применяют шаровидные пикнометры вместимостью 100 и 200 см^3 (ГОСТ 11723—66).

Определение плотности жидкости

Для определения плотности жидкости выполняют три взвешивания:

- 1) пустого пикнометра;
 - 2) пикнометра, заполненного дистиллированной водой до заданного уровня;
 - 3) пикнометра, заполненного испытуемой жидкостью до того же уровня.
- Первые два взвешивания позволяют определить вместимость пикнометра, а первое и третье — массу испытуемой жидкости в объеме пикнометра. По полученным данным подсчитывают плотность жидкости.

Выведем общую формулу для определения плотности жидкости при помощи пикнометра, когда вода и жидкость имеют разную температуру. Примем следующие обозначения:

- m_1 - масса гирь, уравнивающих пустой пикнометр в воздухе плотностью D_1 ;
- m_2 - масса гирь, уравнивающих пикнометр с дистиллированной водой в воздухе плотностью D_2 при температуре t_2 ;
- m_3 - масса гирь, уравнивающих пикнометр с испытуемой жидкостью в воздухе плотностью D_3 при температуре t_3 ;
- V - объем стекла пикнометра;
- V_2 - вместимость пикнометра до заданного уровня при температуре t_2 ;
- V_3 - то же, при температуре t_3 ;
- ρ — плотность дистиллированной воды при температуре t_2 ;
- ρ_{t_3} плотность испытуемой жидкости при температуре t_3 ;
- D_m - плотность материала, из которого изготовлены гири;
- D_c - плотность стекла;
- β - коэффициент объемного расширения стекла.

Условия равновесия весов при трех указанных выше последовательных взвешиваниях пикнометра можно записать в виде системы трех уравнений (17.35)

$$\begin{aligned} v(D_c - D_1) &= m_1 \left(1 - \frac{D_1}{D_m}\right) \\ v(D_c - D_2) + V_2(\rho - D_2) &= m_2 \left(1 - \frac{D_2}{D_m}\right), \\ v(D_c - D_3) + V_3(\rho_{t_3} - D_3) &= m_3 \left(1 - \frac{D_3}{D_m}\right) \end{aligned} \quad (17.35)$$

Определив из первого уравнения (17.35) значение V и подставив его во второе и третье уравнения, получим систему уравнений (17.36)

$$\begin{aligned} V_2(\rho - D_2) &= m_2 \left(1 - \frac{D_2}{D_m}\right) - m_1 \frac{1 - \frac{D_2}{D_m}}{1 - \frac{D_1}{D_m}} \left(1 - \frac{D_1}{D_m}\right) = A \\ V_3(\rho_{t_3} - D_3) &= m_3 \left(1 - \frac{D_3}{D_m}\right) - m_1 \frac{1 - \frac{D_3}{D_m}}{1 - \frac{D_1}{D_m}} \left(1 - \frac{D_1}{D_m}\right) = B \end{aligned} \quad (17.36)$$

Величины V_3 и V_2 связаны между собой зависимостью (17.37)

$$V_3 = V_2[1 + \beta(t_3 - t_2)], \quad (17.37)$$

Разделив почленно уравнение два на уравнение 1 из системы уравнений (17.36) и учтя выражение (17.37), получим уравнение (17.38)

$$\frac{\rho_{t_3} - D_3}{\rho - D_2} = \frac{B}{A[1 + \beta(t_3 - t_2)]}, \quad (17.38)$$

откуда для искомой плотности жидкости найдем окончательно

$$\rho_{t_3} = \frac{[m_3(1 - \frac{D_3}{D_m}) - m_1 N(1 - \frac{D_3}{D_c})](\rho - D_2)}{[m_2(1 - \frac{D_2}{D_m}) - m_1 N(1 - \frac{D_2}{D_c})][1 + \beta(t_3 - t_2)]} + D_3, \quad (17.39)$$

$$\text{где } N = \frac{1 - \frac{D_1}{D_m}}{1 - \frac{D_1}{D_c}}$$

Выражение (17.39) учитывает все величины, влияющие на результат измерения плотности, и поэтому обеспечивает наивысшую точность измерения.

В ряде случаев при введении определенных условий формула (17.34) может быть значительно упрощена. Если плотность воздуха на протяжении периода, в течение которого выполняют взвешивания, остается постоянной, т. е. $D_1 = D_2 = D_3 = D$, то формула (17.39) принимает вид (17.40)

$$\rho_{t_3} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1}(\rho - D)[1 + \beta(t_2 - t_3) + D], \quad (17.40)$$

Обычно при работе с пикнометром выдерживают одинаковую температуру воды и жидкости, что дополнительно упрощает приведенную выше формулу. Действительно, при $t_1 = t_2 = t$

$$\rho_t = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1}(\rho - D) + D, \quad (17.41)$$

Определение плотности твердого тела

При измерении плотности твердого тела пикнометрическим методом также выполняют три взвешивания:

- 1) масса испытуемого тела в воздухе;
- 2) масса пикнометра, наполненного дистиллированной водой или какой-либо другой вспомогательной жидкостью известной плотности;
- 3) масса пикнометра, наполненного той же жидкостью с погруженным в нее испытуемым телом, причем в обоих случаях жидкость наливают до одного и того же уровня.

Уравнения равновесия при указанных взвешиваниях запишутся в виде (17.42)

$$\begin{aligned} V(\rho_t - D) &= M(1 - \frac{D}{D_m}) \\ m + V_0\rho - (V_0 + \nu)D &= m_1(1 - \frac{D}{D_m}), \\ m + V\rho_t + (V_0 - V)\rho - (V_0 + \nu)D &= m_2(1 - \frac{D}{D_m}) \end{aligned} \quad (17.42)$$

где V — объем стекла пикнометра;

V_0 - вместимость пикнометра до заданного уровня;

V — объем испытуемого тела;

m - масса пустого пикнометра;

M — масса гирь, уравнивающих тело в воздухе;

m_1 - масса гирь, уравнивающих пикнометр со вспомогательной жидкостью;

m_2 - масса гирь, уравнивающих пикнометр с жидкостью и погруженным в нее телом;

m_0 - масса гирь, уравнивающих пустой пикнометр;

ρ - плотность вспомогательной жидкости;

ρ_t - плотность испытуемого тела;

D — средняя плотность воздуха во время взвешиваний;

D_m - плотность материала, из которого изготовлены гири.

Указанные выше величины соответствуют температуре t , для которой определяют плотность ρ_t тела. Уравнение равновесия, характеризующее взвешивание пустого пикнометра можно представить в виде (17.43)

$$m - \nu D = m_0 \left(1 - \frac{D}{D_m}\right), \quad (17.43)$$

После вычитания уравнения (17.43) последовательно из второго и третьего уравнений (17.42) получим (17.44)

$$\begin{aligned} V_0(\rho - D) &= (m_1 - m_0) \left(1 - \frac{D}{D_m}\right) \\ V(\rho_t - \rho) + V_0(\rho - D) &= (m_2 - m_0) \left(1 - \frac{D}{D_m}\right), \end{aligned} \quad (17.44)$$

откуда почленным вычитанием найдем

$$V(\rho_t - \rho) = (m_2 - m_1) \left(1 - \frac{D}{D_m}\right), \quad (17.45)$$

Подставив величину V из первого уравнения (17.42) в уравнение (17.45), после преобразований получим искомую формулу для определения плотности твердого тела (17.46)

$$\rho_t = \frac{M_p - (m_2 - m_1)D}{M - (m_2 - m_1)}, \quad (17.46)$$

Пользование пикнометром

При пользовании пикнометром точность измерения плотности в значительной степени зависит от чистоты поверхности стекла внутри и снаружи прибора. Поэтому, приступая к измерениям, пикнометр необходимо тщательно промыть последовательно хромовой смесью, дистиллированной водой и ректификованным этиловым спиртом. Если пикнометр загрязнен маслом, то сначала следует промыть его бензином, а затем указанными жидкостями. Промытый пикнометр необходимо хорошо просушить.

Пикнометры с достаточно широким горлом при промывке заполняют жидкостью при помощи пипетки с оттянутым капилляром.

Для заполнения пикнометров с узким горлом (капиллярным отверстием) приходится создавать вакуум. С этой целью к пикнометру подключают сифон, одно колено которого выполнено в виде капилляра, а другое - в виде широкой трубки. Капиллярную трубку вводят в пикнометр, а широкую - в сосуд с жидкостью. Капиллярная трубка имеет боковой отросток, который

присоединяют к водоструйному насосу. Трубка сифона должна подходить близко ко дну пикнометра.

Для стока жидкости между пикнометром и насосом включают колбу, в которую опущены трубки, соединенные с пикнометром и насосом; колба должна иметь сливной кран.

При просушивании широкую трубку сифона соединяют последовательно с четырьмя банками: в первой (считая от пикнометра) находится стеклянная и хлопчатобумажная вата для очистки воздуха от механических примесей, во второй и третьей - серная кислота, в четвертой — хлористый кальций).

Капиллярный пикнометр, показанный на рисунок 17.14 г, заполняют жидкостью без применения дополнительных устройств: при погружении отогнутого конца трубки в жидкость последняя сначала затягивается под действием капиллярных сил, а затем по принципу Сифона заполняет весь пикнометр. Возможность заполнения пикнометра без создания вакуума имеет особое значение при работе с летучими жидкостями.

Для определения плотности жидкости промытый и просушенный пикнометр взвешивают (вместе с пробкой) на аналитических весах класса 1 с микрошкалой (цена деления 0,1 мг). При этом следует применять способ взвешивания на одном плече.

Затем пикнометр наполняют свежей дистиллированной водой несколько выше метки (пикнометр с круговой меткой) или до края отверстия (пикнометр с капиллярным отверстием) и выдерживают не менее получаса в термостате или водяной ванне при требуемой температуре (обычно 20 °С). Пикнометр устанавливают в термостате на пробковом поплавке.

Точность поддержания температуры термостата определяется требуемой точностью измерений. Для получения плотности с погрешностью в четвертом десятичном знаке достаточно поддерживать температуру постоянной при отклонениях в пределах $\pm 0,1$ °С.

При более точных измерениях предельная погрешность поддержания постоянной температуры воды должна быть порядка 0,01 - 0,02 °С, а иногда и менее.

Если пикнометр не оснащен термометром, то для контроля за температурой жидкости внутри пикнометра в термостат помещают небольшую колбу с термометром, наполненную той же жидкостью.

Когда температура воды в пикнометре, а следовательно, и ее уровень перестанут изменяться, излишек воды над меткой удаляют таким образом, чтобы метка касалась нижний или верхний край мениска в зависимости от того, определяют ли плотность соответственно прозрачной или непрозрачной жидкости. За положением мениска следует наблюдать через лупу.

У пикнометров с капиллярным отверстием, помещенных в термостат, излишек воды, выступающий из отверстия, удаляют фильтровальной бумагой.

После того как уровень воды установится против метки, внутреннюю поверхность горла пикнометра вытирают свернутой в трубку фильтровальной бумагой (при этом бумага не должна касаться мениска воды).

Пикнометр с водой закрывают пробкой и тщательно обтирают снаружи льняной тряпкой, не оставляющей на поверхности пикнометра хлопьев, которые могут изменить массу пикнометра. Затем пикнометру дают возможность принять температуру окружающего воздуха, после чего взвешивают его на указанных выше весах.

Для получения более точного результата рекомендуется описанное испытание повторять несколько раз и принимать в расчет среднее из найденных таким образом значений.

Далее аналогичным путем взвешивают пикнометр с испытуемой жидкостью. Предварительно пикнометр промывают и высушивают.

При точных измерениях пикнометр с жидкостью, не закрытый пробкой, рекомендуется нагреть до кипения жидкости для удаления из нее растворенного воздуха. Дальнейшие измерения выполняют после охлаждения пикнометра.

Для упрощения работы при частом пользовании пикнометром удобнее заранее определить его постоянные, т. е. значения m_1 (массы гирь, уравновешивающих пустой пикнометр) и m_2 (массы гирь, уравновешивающих пикнометр с дистиллированной водой при определенной температуре) с тем, чтобы в дальнейшем при определении плотности проводить лишь одно взвешивание пикнометра с жидкостью для нахождения m_2 .

С учетом того, что стекло пикнометра со временем выщелачивается и стирается (особенно в шлифованных местах), следует периодически повторно определять m_1 и m_2 .

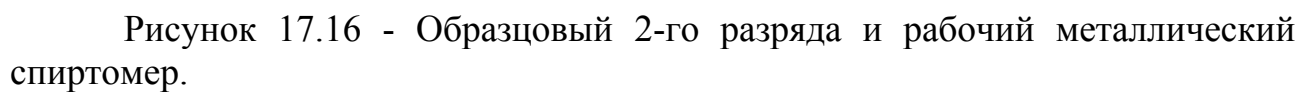
Плотность вязких жидкостей и твердых тел определяют в пикнометре с меткой (рисунок 17.14 е). Если испытуемое тело не проходит через отверстие в горле стандартного пикнометра и не может быть измельчено (при определении плотности целого изделия, например, гири), то в качестве пикнометра применяют цилиндрический стеклянный стакан с притертой к его краям плоской стеклянной крышкой. Стакан наполняют соответствующей вспомогательной жидкостью так, чтобы при надвигании крышки на плоскость краев стакана жидкость «срезалась» и под крышкой не оставались воздушные пузырьки.

Как видно из формулы (17.46), для определения плотности твердого тела необходимо взвесить это тело, затем взвесить пикнометр со вспомогательной жидкостью, наполненной в него до требуемого уровня при определенной температуре, опустить тело в пикнометр с жидкостью, установить жидкость до первоначального уровня при той же температуре и далее взвесить пикнометр с телом и жидкостью.

В качестве вспомогательной жидкости обычно используют воду. Если испытуемое тело растворяется или окисляется в воде, то применяют какую-либо другую жидкость (например, бензин, бензол, керосин или спирт), причем предварительно плотность ее измеряют одним из описанных выше способов.

Плотность вязкой жидкости определяют так же, как и плотность твердого тела, с той лишь разницей, что массу M гирь, уравновешивающих взятое количество испытуемой жидкости в воздухе, находят взвешиванием

17.1.4 Спиртомеры /32/



Измерение массы

В практике измерения массы применяют чрезвычайно разнообразные приборы и устройства, различные по назначению, области применения, режиму и принципу работы. Число конструктивных модификаций и исполнений исчисляется сотнями. В связи с этим создание единой классификационной схемы в данной области измерений является чрезвычайно сложной задачей.

Определение необходимых разновидностей приборов и устройств для измерения и дозирования массы, количества типов и типоразмеров, создание типовых стандартизированных моделей на базе комплекса технических параметров, положенных в основу разработки технических требований к этим моделям, - всё это должно базироваться на схеме классификации, устанавливающей основные эксплуатационные и конструктивные признаки. Эти признаки позволяют охарактеризовать прибор на любой степени классификации (группа, вид, тип, модель, модификация), определить его место в общем комплексе приборов и устройств для измерения и дозирования массы.

В 1953 г., учитывая острую нужду в классификаторе, был разработан ГОСТ 793-53 «Весы. Классы. Нормы точности», распространявшейся в основном на весы общего назначения и лабораторные. Стандарт не охватывал обширной номенклатуры весоизмерительных приборов технологического назначения: автоматических порционных весов для суммарного учёта, дозирования, фасовки, весов металлургической промышленности, крановых и др.

В настоящее время разработана общая классификация приборов и устройств для измерения и дозирования массы; конечной целью классификации является установление рациональных видов и типов и числовых значений (рядов) параметров применительно к требованиям современной техники измерения массы.

17.1.5 Аналитические весы /32/

По конструктивным признакам аналитические весы делятся на двух - чашечные с равноплечим трех - призмным коромыслом и одночашечные с двух - призмным коромыслом. По точности весы разделяются на весы класса 1, применяемые при микрохимических и химических анализах высшей точности, и весы класса 2, служащие для взвешиваний при химических анализах обычной точности.

При взвешиваниях на аналитических весах применяют гири классов 1 и 2 общего назначения по ГОСТ 7328 — 01, гири-рейтеры классов 1 и 2 и встроенные гири.

В бывшем СССР выпускались аналитические весы с наибольшим пределом взвешивания до 20 г микроаналитическими, а до 1 г — пробирными, так как первые применяют при микроанализах, а вторые при определении пробы золота.

За рубежом отдельные фирмы, помимо весов с указанными пределами измерений, выпускают весы с наибольшим пределом взвешивания 30; 50; 80; 160; 500; 1000 г и более. Простейшие двух - чашечные аналитические весы

показаны на рисунке 17.18. Равноплечее коромысло 6 своей опорной призмой, опирается на подушку, укрепленную на колонке 8. К грузоприемным призмам, прикрепленным к коромыслу, подвешены серьги 7 с чашками 12. Для отсчета колебаний служит стрелка 10, заостренный (ножеобразный) конец которой передвигается параллельно шкале 11. Колонка укреплена на опорной доске из дерева, стекла, металла или полимерных материалов с винтовыми ножками 13 для установки весов по отвесу. Для остановки колебаний весов, а также для изолирования призм от подушек при нерабочем состоянии весов служит изолир, ручка 14 которого расположена перед витриной 5 весов, защищающей их от пыли, влаги, потоков воздуха и нагревания.

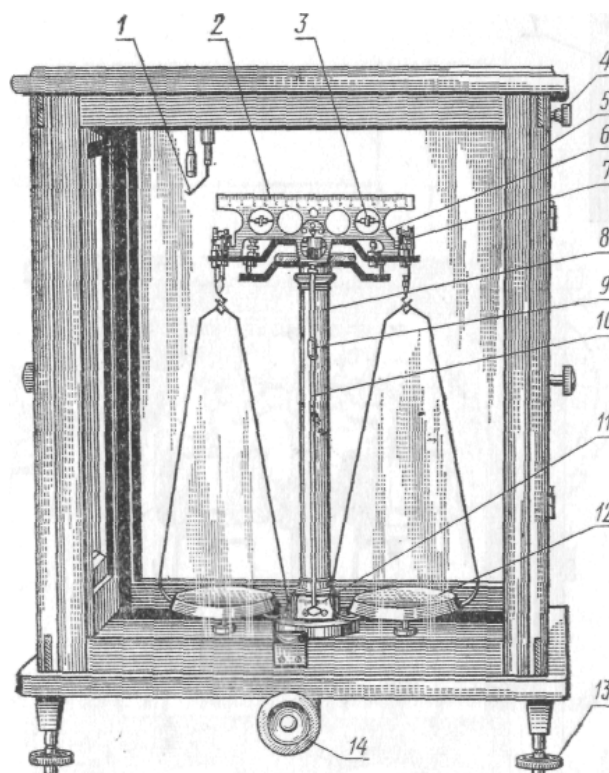


Рисунок 17.18 - Простейшие аналитические весы

На верхней части коромысла или на планке, прикрепленной к коромыслу, нанесена реперная шкала 2.

Рейтер навешивается на коромысло с помощью устройства, состоящего из крючка 1, укрепленного на подвижной штанге с ручкой 4, выведенной на боковую сторону витрины. В целях ускорения процесса взвешивания двух - чашечные весы (рисунок 17.19) снабжаются устройством 2 для механического наложения миллиграммовых гирь и воздушными успокоителями 3, а для уточнения и облегчения отсчета показаний - оптическим устройством 4, осветительная система которого, питается от понижающего трансформатора 1 напряжением 220/6 или 127/6 В.

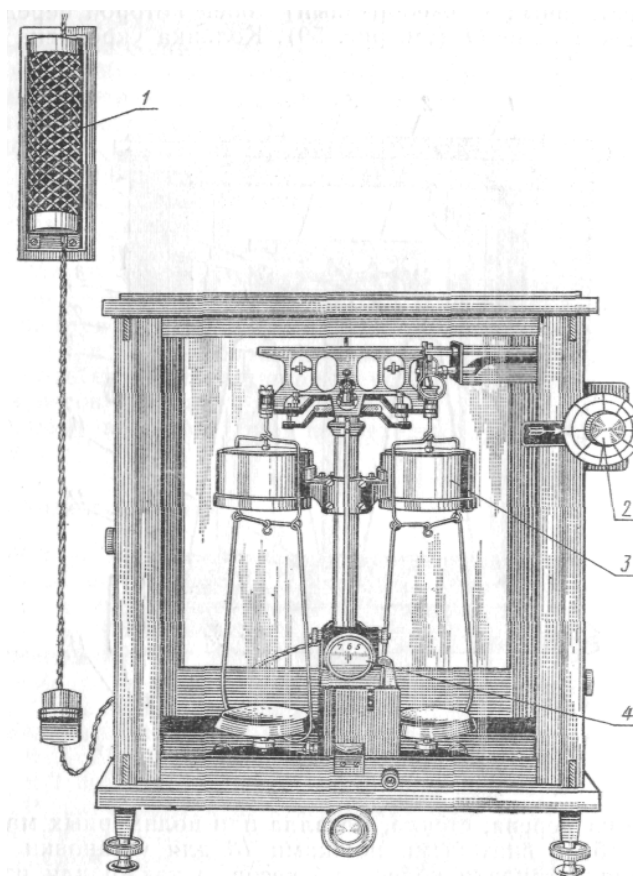


Рисунок 17.19 - Аналитические весы с успокоителями

Схема устройства для наложения гирь показана на рисунке 17.20. Здесь миллиграммовые гири 3, в форме колец можно надевать и снимать с планки, укрепленной на правой серьге весов, с помощью рычагов 2. Рычагами управляют с помощью двух лимбов 4 и 5, расположенных с правой стороны витрины. При вращении малого лимба 5 происходит накладывание или снятие десятков миллиграммов, а при вращении большого лимба 4 сотен миллиграммов.

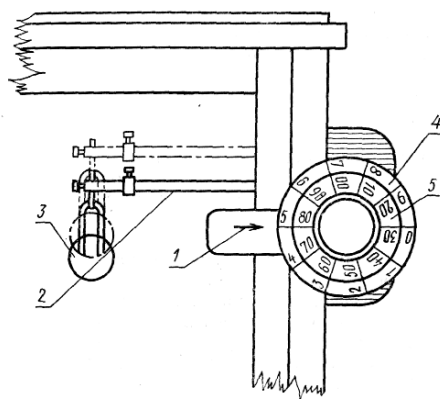


Рисунок 17.20 - Схема механизма для наложения встроенных миллиграммовых гирь

Отсчет выполняют по неподвижному указателю 1. В случае, показанном на рисунке 17.20, на планку помещено 580 мг.

Отдельные зарубежные фирмы выпускают аналитические весы с равноплечим коромыслом, к одному плечу которого подвешена чашка, а к другому — комплект граммовых и миллиграммовых гирь, уравнивающий полную нагрузку на чашке. Такая конструкция большого распространения не получила, так как при взвешивании необходимо учитывать ошибку из-за неравноплечести.

В связи с этим в настоящее время двух - чашечные весы с равноплечим трехпризменным коромыслом вытесняются одно - чашечными весами с двух - призменным коромыслом, на которых взвешивание выполняют на одном плече, и, таким образом, ошибка из-за неравноплечести автоматически устраняется. Современные аналитические одночашечные весы швейцарской фирмы «Меттлер» показаны на рисунке 17.21 а, их принципиальная схема — на рисунке 17.21 в. В этих весах коромысло 6 опорной призмой 11 опирается на подушку 12, укрепленную в стойке 13. К грузоприемной призме 2 с помощью серьги 3 подвешена планка с набором гирь 1 и чашка 20. Масса гирь, входящих в набор, равна наибольшему пределу взвешивания. На правом плече коромысла укреплены поршень 7 воздушного успокоителя, противовес 10 и микрошкала 8. Поршень 7 совершает колебания внутри неподвижного стакана 9, благодаря чему и осуществляется торможение колебаний. Противовес 10 вместе с правым плечом коромысла служит для грубого уравнивания левого плеча и всей подвесной системы (чашки, серег и гирь). Окончательно тарируют весы с помощью грузика 4, а регулятором чувствительности является грузик 5. Весы снабжены изолиром, который состоит из вала 16 и эксцентриков 14 и 17. При поворотах ручки 18 эксцентрик 14 поднимает и опускает шток 15, отпирающий и запирающий коромысло 6, а эксцентрик 7 воздействует на грибок 19, отпирающий и запирающий чашку 20.

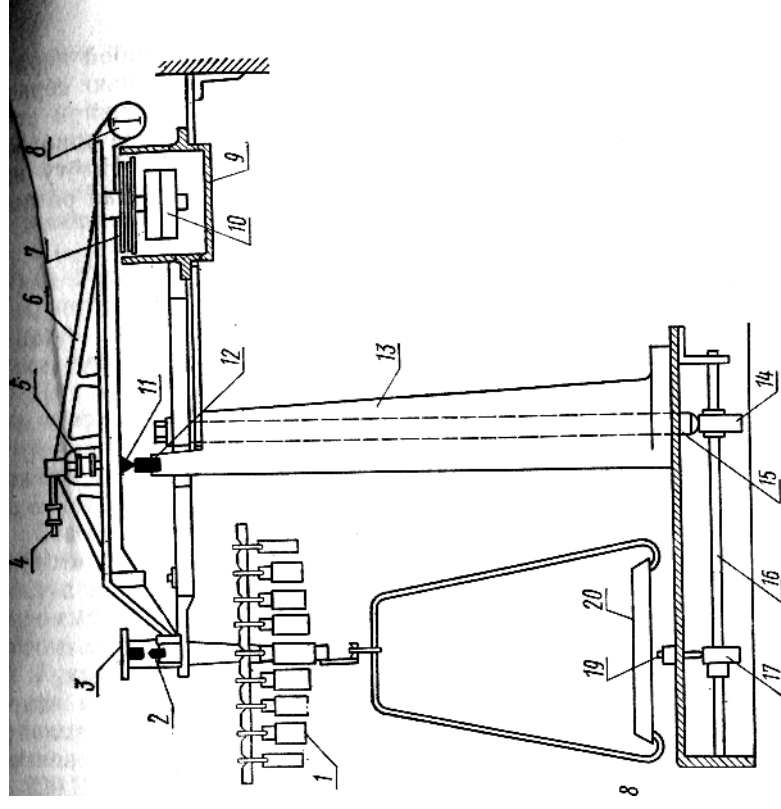
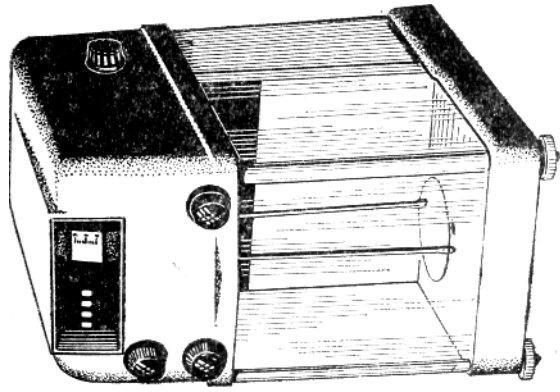


Рисунок 17.21 – Одночашечные аналитические весы «Меттлер»

При взвешиваниях оператор помещает навеску на чашку, а затем снимает необходимое количество гирь до тех пор, пока весы не придут в равновесие. Гири снимают с помощью ручек, выведенных на переднюю сторону витрины и связанных с рычагами, воздействующими на гири.

Отсчётное устройство весов (рисунок 17.21 б), вынесенное на переднюю панель витрины, состоит из ряда окошек, через которые видны цифры, соответствующие граммам и десятым долям грамма, и экрана, на котором видна в увеличенном виде микрошкала, служащая для отсчета целых миллиграммов. Десятые доли миллиграмма отсчитывают по нониусу. Так, на рисунке показан результат 137,8505 г.

Весы, выпускаемые заводом «Госметр», несколько отличаются от описанных конструктивным исполнением. Так, в весах завода «Госметр» гири расположены не над чашкой, а под ней, указатель целых граммов и десятых долей грамма находится не в нижней, а в верхней части передней панели витрины. Следует отметить, что Ленинградский завод «Госметр» и ряд зарубежных фирм выпускают аналитические весы со встроенными гирями на весь диапазон взвешивания.

Первая модель таких весов была сконструирована в СССР еще в 1934 г. И.Д.Менделеевым (сыном великого ученого) специально для взвешивания по способу, предложенному Д. И. Менделеевым. Ниже приводится описание аналитических весов с наибольшим пределом взвешивания 100 г.(модель ОВМ – 100), выпускаемых заводом «Госметр». Коромысло 9 этих весов представляет собой неравноплечий рычаг, к короткому плечу которого с помощью серьги подвешена чашка 8, а к длинному прикреплены подвижной стакан воздушного успокоителя 10, являющийся одновременно противовесом, и прозрачная микрошкала 11. На ту же серьгу, на которой весит чашка, подвешена прямоугольная рамка подвеска 7, к середине нижнего звена 6 которой прикреплен вертикальный стержень 3. Он пропущен сквозь плату в отделение весов, где расположены механизмы изолира, а также съема и наложения гирь. Здесь к стержню прикреплены две параллельные рейки с V-образными вырезами – гнездами.

Весы заключены в металлическую витрину с выдвижными боковыми дверцами. Крышку витрины снять легко, что обеспечивает доступ к коромыслу и к регуляторам тары. Для предохранения коромысла от нагрева оно отделено от камеры взвешивания горизонтальной перегородкой.

Рукоятка изолира выведена на правую сторону. При освобождении весов от изолира одновременно загорается лампочка, освещающая оптическую шкалу. Наличие в весах трансформатора позволяет включать весы в осветительную сеть напряжением 127 и 220В.

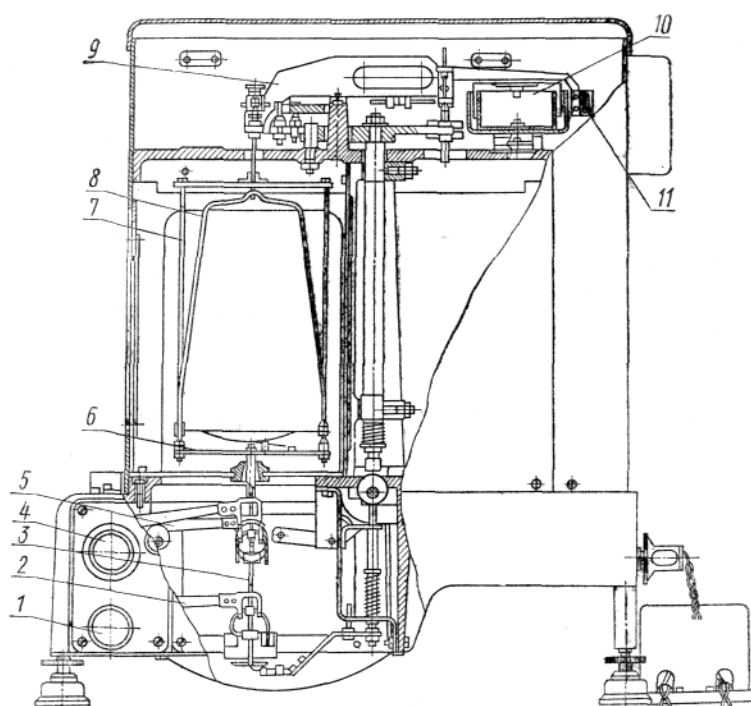


Рисунок 17.22 - Конструктивная схема весов ОВМ-100

Технические характеристики лабораторных весов приведены в таблицу 17.5

Таблица 17.5 – Технические характеристики лабораторных весов

Весы	Наибольши й предел взвешиван ия, г	Цена деления	Варианты показаний	Погреш-ность из-за неравнопле- чести
		мг		
Аналитические	500	2-10	2	5
	200	0,1-1	0,1-0,5	1-2
	100	0,05-0,2	0,1-0,2	1-2
Полумикроанал ити-ческие	50	0,01-0,02	0,02	0,25
	20	0,01	0,01	0,2
Микроаналити- Ческие	30	0,01	0,002	0,01
	20	0,001-0,005	0,002-0,005	0,01-0,04
Пробирные	1-2	0,01-0,02	0,01-0,02	0,04

17.1.6 Основные требования к газоанализаторам и тахометрам /32/

Для определения содержания окиси углерода и суммы углеводородов в отработавших газах автомобилей следует применять газоанализаторы непрерывного действия, работающие на принципе инфракрасной спектроскопии, со следующими метрологическими характеристиками:

- основная приведенная погрешность газоанализатора должна быть не более $\pm 5\%$ верхнего предела измерений для каждого диапазона;
- постоянная времени газоанализатора должна быть не более 60 с;
- шкала газоанализатора окиси углерода должна быть отградуирована по бинарной газовой смеси (окись углерода в воздухе или азоте) в объемных долях, выраженных в процентах окиси углерода от 0 - 5 % до 0 - 10 %;
- шкала газоанализатора суммы углеводородов должна быть отградуирована по бинарной газовой смеси (пропан в азоте); в объемных долях, выраженных в частях на миллион гексана (млн⁻¹), 0-1000 млн⁻¹ и 0-10000 млн⁻¹;
- шкала тахометра для измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя должна иметь два диапазона: 0— 1000 мин⁻¹ и 0-10000 мин⁻¹;
- погрешность измерения частоты вращения для каждого диапазона должна быть не более $\pm 2,5\%$ верхнего предела измерений.

Допускается применять газоанализаторы, работающие на других принципах действия, отвечающих требованиям пп. 1 - 3 настоящего приложения и дающих показания, идентичные с принятыми средствами измерений.



Рисунок 17.23 - Тахометры магнитоиндукционные 8ТМ

Допускаемая основная погрешность, %, не более:
в пределах рабочего диапазона ± 1

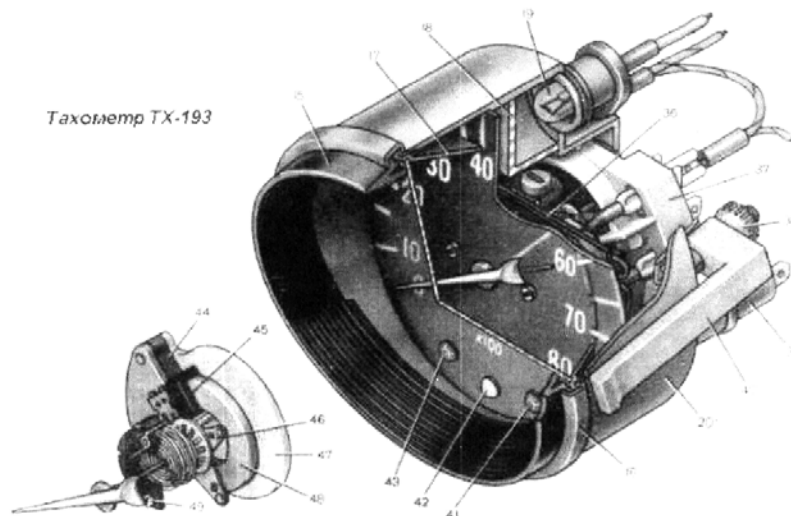


Рисунок 17.24 - Тахометр TX193

Тахометр типа ТХ-193 установлен на щитке приборов и прикреплен к нему с помощью двух скоб 40 и гаек 38.

Тахометр имеет пластмассовый корпус 20, к которому спереди металлическим хромированным рантом 16 крепятся пластмассовые стеклодержатель 17 и ободок 15, а сзади тремя винтами прикреплен корпус 37 миллиамперметра. Электронная часть тахометра смонтирована на плате 36 из фольгированного гетинакса. Шкала крепится к корпусу миллиамперметра двумя винтами. На шкале цветными линиями выделены зоны опасных оборотов коленчатого вала. Предварительная зона опасных оборотов (5500-6000) выделена линиями желтого цвета, а зона опасных оборотов (свыше 6000) линиями красного цвета. Шкала прибора освещается лампой 19 типа АМН 12-3, которая вставляется в ламподержатель, привальцованный к верхней части корпуса. Свет от лампы проходит через голубой пластмассовый светофильтр 18, приклеенный к корпусу, затем через зазор между шкалой и корпусом и равномерно освещает шкалу. В нижней части шкалы имеются три отверстия, закрытые цветными пластмассовыми светофильтрами 41, 42 и 43. Через них проходит свет от контрольных ламп типа АМН 12-3, которые устанавливаются в отдельных ламподержателях, привальцованных к нижней части корпуса прибора. Для контрольных ламп в нижней части корпуса имеется специальный отсек, разделенный перегородками на три отдельные секции. Принцип действия тахометра основан на измерении частоты следования импульсов напряжения в первичной цепи системы зажигания двигателя. В четырёхцилиндровом четырёхтактном двигателе за один оборот валика распределителя зажигания контакты прерывателя размыкаются и замыкаются четыре раза (два раза за один оборот коленвала). Следовательно, за один оборот валика в первичной цепи системы зажигания создается четыре импульса тока и напряжения (два импульса за один оборот коленвала). Чем выше частота вращения коленчатого вала двигателя, тем больше частота следования импульсов.

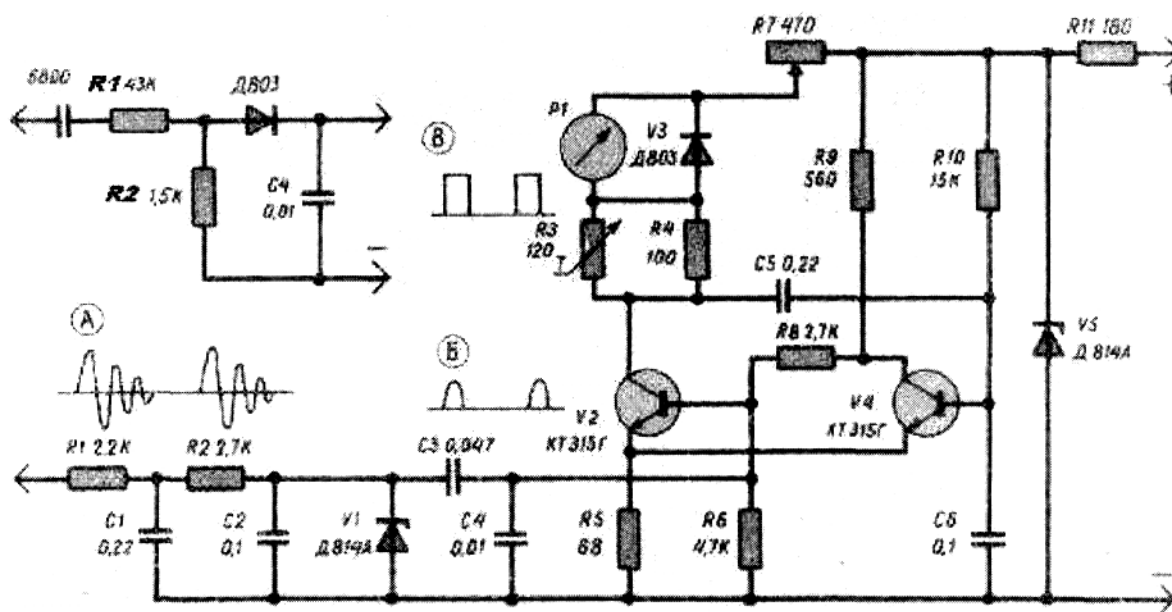


Рисунок 17.25 - Принципиальная схема тахометра ТХ-193.

Импульсы напряжения в форме затухающей синусоиды (А) снимаются с конца первичной обмотки катушки зажигания и подаются на вход формирователя запускающих импульсов, который состоит из звеньев К1-С1, К2-С2, VI и С3-С4. От формирователя запускающие импульсы уже определенной величины и формы (Б) подаются на вход ждущего мультивибратора, собранного на транзисторах У2 и У4. Мультивибратор преобразует их в импульсы тока прямоугольной формы (В) с постоянной амплитудой и длительностью. Эти импульсы проходят через катушку миллиамперметра, включенную в коллекторную цепь транзистора М2. В зависимости от частоты следования импульсов меняется средняя величина силы тока, проходящего через обмотку катушки миллиамперметра, и тем на большую величину отклоняется стрелка прибора. Прибор обеспечивает отклонение стрелки на угол 270° при силе тока 10 мА. Стабилитрон У5 стабилизирует напряжение питания, чтобы его колебания не влияли на точность показаний прибора. Терморезистор К3 служит для компенсации температурной погрешности прибора. Диод У3 предназначен для защиты транзистора У2 от пробоя ЭДС самоиндукции, возникающей в обмотке миллиамперметра. Миллиамперметр применен магнитоэлектрического типа. Его магнитная система состоит из постоянного магнита 44, зажатого между двумя магнитопроводами - наружным 47 и внутренним 48. Магнит и магнитопроводы прикреплены к пластмассовому корпусу 37. Внутренний магнитопровод имеет кольцевую часть, которую охватывает катушка 45, закрепленная на держателе 46. Ось миллиамперметра вращается в двух втулках. Передняя втулка закреплена в корпусе 37, а задняя крепится к наружному магнитопроводу 47. Концы оси смазываются при сборке специальной силиконовой жидкостью, которая обладает демпфирующим свойством - гасит колебания стрелки при движении автомобиля.

Для измерения параметров двигателей внутреннего сгорания применяются множество измерительных устройств, от обычных, со стрелочными индикаторами, до очень точных, цифровых. Предлагаются некоторые виды измерителей параметров двигателей внутреннего сгорания (ДВС)./32/

ДОС 2000. Прибор предназначен для диагностики автомобилей Европейских, Японских, Корейских, Американских производителей. ДОС 2000 - это многофункциональный прибор, состоящий из системного сканера, 4-х канального цифрового осциллографа, осциллографа зажигания, т. д

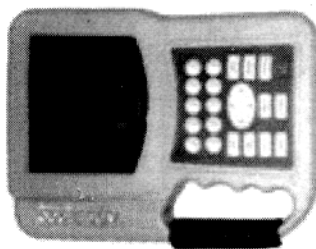


Рисунок 17.26 - ДОС 2000

POA-2100. Портативный компьютерный прибор второго поколения. Предназначен для диагностики двигателя, визуального анализа и измерения параметров сигналов в различных электронных и электрических системах автомобиля.



Рисунок 17.27 - POA-2100

MT5-5100. Прибор предназначен для диагностики двигателя, а также визуального анализа и измерения параметров сигналов в различных электронных и электрических системах автомобиля.

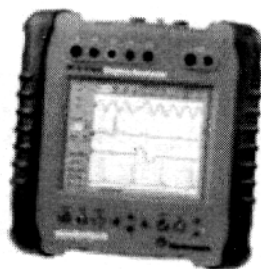


Рисунок 17.28 MT5-5100

Engine Boss. Компьютерный мотор-тестер предназначен для диагностики двигателя, визуального анализа и измерения параметров сигналов в различных электронных и электрических системах автомобиля, с выводом информации на монитор персонального компьютера.

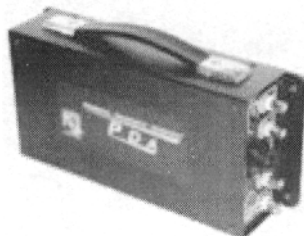


Рисунок 17.29 - Engine Boss

Vision Premier. Vision Premier - это новейший мотор тестер модульной конфигурации. Предназначен для комплексной диагностики двигателя и его систем, а также визуального анализа и измерения параметров сигналов в различных электронных и электрических цепях автомобиля.

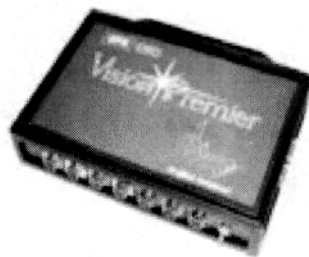


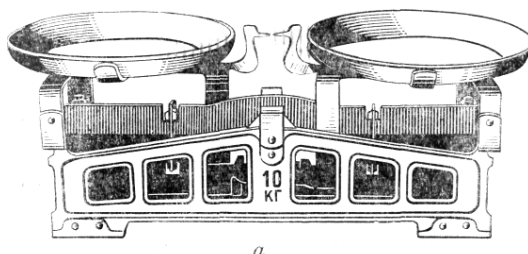
Рисунок 17.30 - Vision Premier

Тахометры магнитоиндукционные 8ТМ. Зарегистрированы в Госреестре средств измерений под № 4666-96. Предназначены для непрерывного измерения частоты вращения частей машин и механизмов.

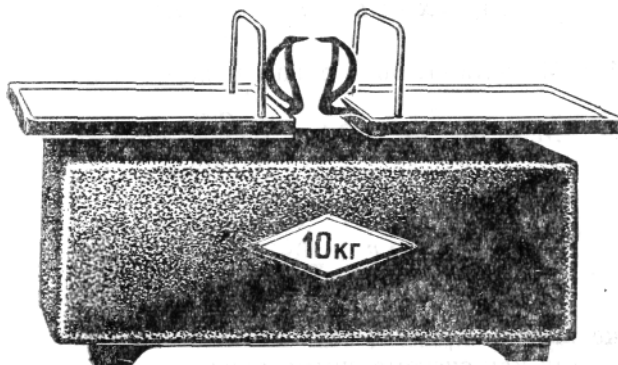


Рисунок 17.31 - Тахометры магнитоиндукционные 8ТМ

17.1.7 Торговые весы /32/



а



б

Рисунок 17.32 - Настольные гирные весы

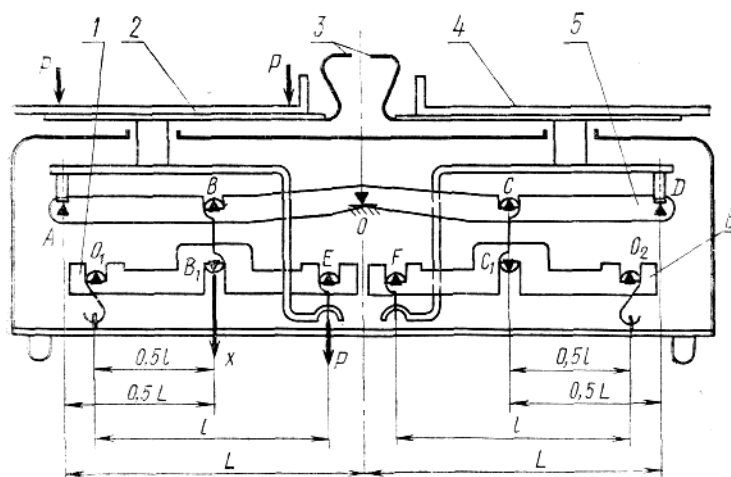
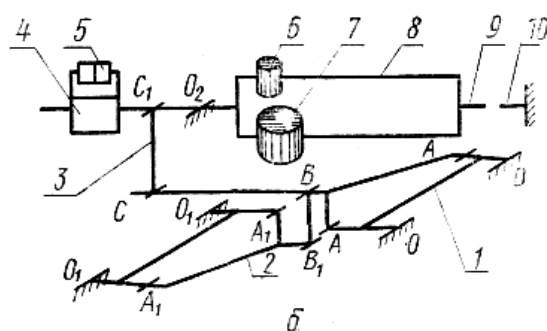
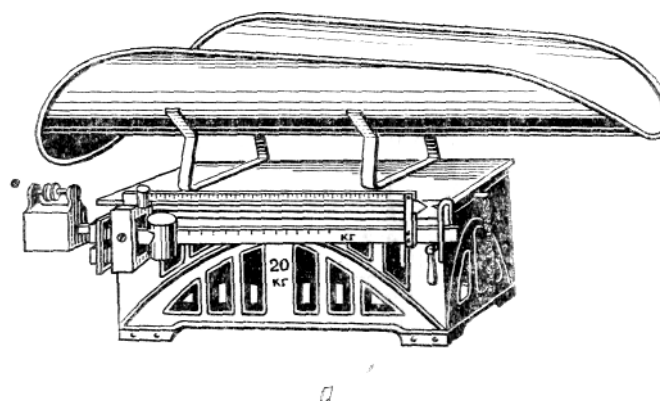


Рисунок 17.33 - Схема настольных гирных весов



а) общий вид; б) схема весов.

Рисунок 17.34 - Настольные медицинские весы

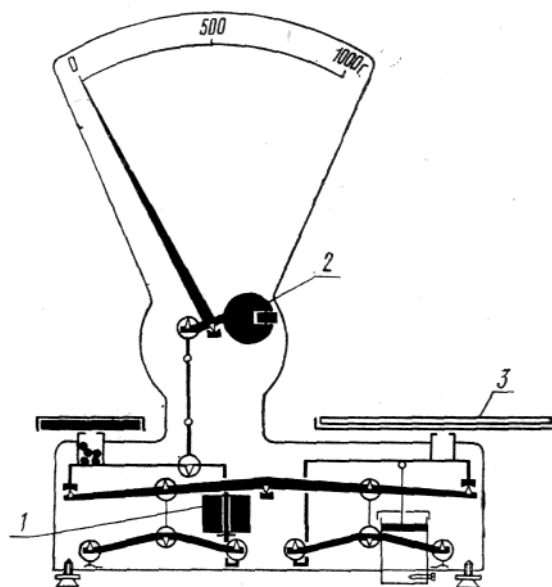
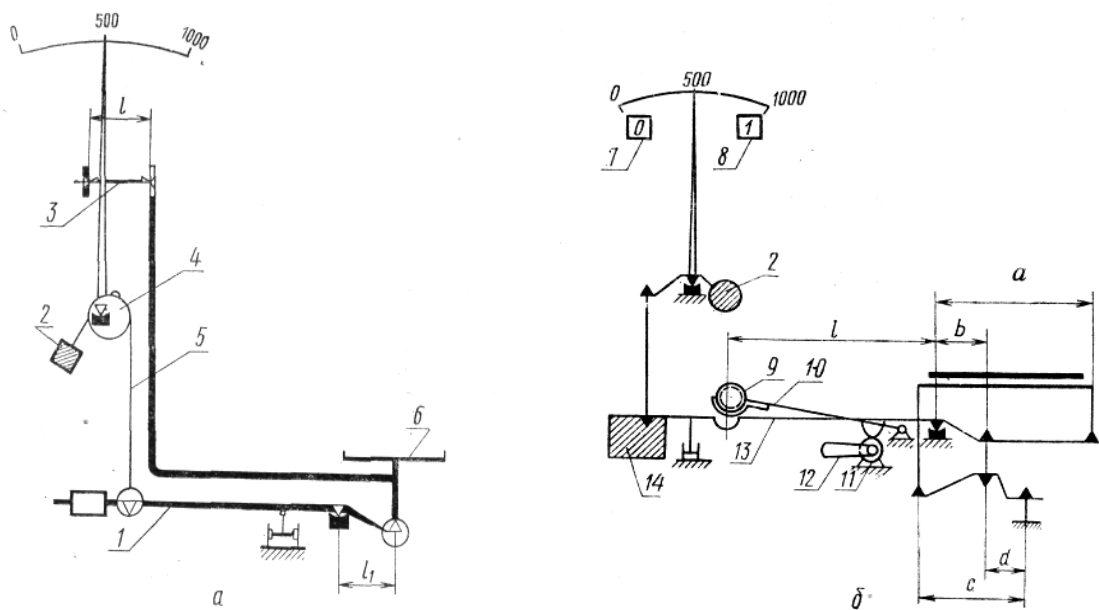


Рисунок 17.35 - Настольные двухплечные циферблатные весы системы Беранже

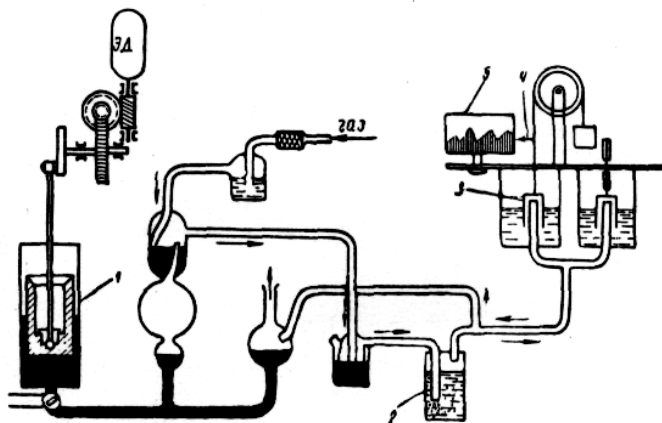
17.1.8 Одночашечные лабораторные весы /32/



а) весы типа Робервада; в) весы типа Берчиже

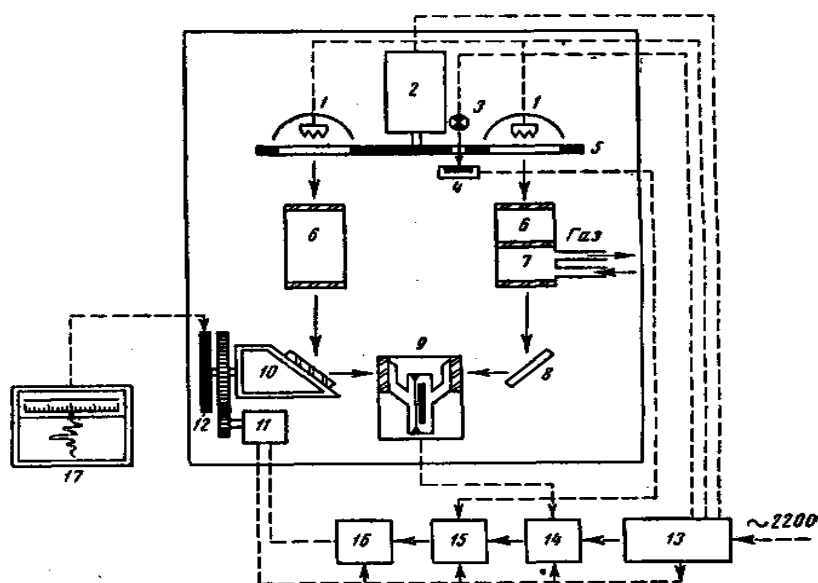
Рисунок 17.36 - Устройство одноплечных весов:

17.1.9 Газоанализаторы /32/



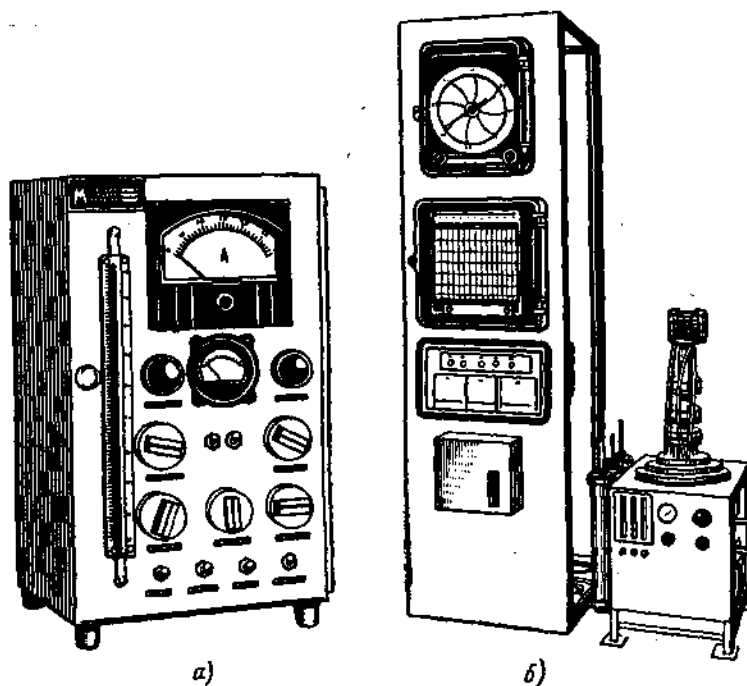
ЭД – электродвигатель, 1 – Ртутный насос, 2 – Поглотительный сосуд,
3 – Колонки, 4 – Перо, 5 – Диаграмма на барабане

Рисунок 17.37 - Схема автоматического химического газоанализатора



1 – Источник инфракрасного излучения, 2 – Синхронный электродвигатель, 3 – Лампа осветителя, 4 – Фотосопротивление, 5 – Диск обтюратора, 6 – Фильтровая камера, 7 – Рабочая камера, 8 – Отражатель, 9 – Лучеприемник, 10 – Компенсирующая камера, 11 – Реверсивный двигатель, 12 – Реохорд, 13 – Источник питания, 14 – Микрофонный каскад усилителя, 15 – Синхронный усилитель мощности, 16 – Усилитель мощности, 17 – Вторичный прибор.

Рисунок 17.38 - Схема опико-акустического газоанализатора типа ОА



a - Лабораторный хроматограф типа ГСТЛ – 3; *б* - Промышленный хроматограф типа ХТП - 63

Рисунок 17.39 – Хроматографы
17.1.10 Стекланные жидкостные термометры /32/

Благодаря сравнительно высокой точности, несложности устройства и дешевизне изготовления стекланные жидкостные термометры являются наиболее распространенными приборами для измерения температур. В зависимости от требований, предъявляемых к термометрам, изготавливается много различных типов и разновидностей стекланных жидкостных (в особенности ртутных) термометров, отличающихся конструкцией, размерами, пределами измерения и другими характеристиками. Принцип действия стекланных жидкостных термометров основан на зависимости между температурой и объемом термометрической жидкости, заключенной в термометре.

Основными элементами конструкции термометра являются: стекланный резервуар с припаянными к нему стекланным капилляром; термометрическая жидкость, заполняющая резервуар и часть капилляра; шкала, градуированная в градусах температуры, расположенная вдоль капилляра. При повышении температуры термометра объем жидкости увеличивается, что заметно по изменению длины столбика жидкости в капилляре.

Конструкция и виды.

Стекланные жидкостные термометры по своей конструкции делятся на три вида: термометры со вложенной шкалой; палочные и термометры со вложенной шкалой; палочные и термометры с наружной шкалой.

В термометрах со вложенной шкалой прямоугольная шкальная пластина и капилляр заключены в стеклannую цилиндрическую (или овального сечения)

оболочку, припаянную к резервуару. Термометры со вложенной шкалой наиболее распространены, так как более удобны для применения. В палочных термометрах применяют массивные толстенные капиллярные трубки из которых выдувается и резервуар. Шкалу термометра наносят непосредственно на наружной стенке капилляра травлением или другим способом. По методу градуировки и применения стеклянные жидкостные термометры делятся на две группы: термометры, градуируемые при полном погружении, и термометры, градуируемые при неполном (рабочем) погружении.

Все рассматриваемые термометры по назначению и области применения могут быть разделены на следующие группы:

лабораторные общего и специального назначения; технические общего и специального назначения.

Термометрические жидкости.

В качестве основных термометрических жидкостей для заполнения стеклянных жидкостных термометров применяют ртуть, керосин, толуол, этиловый спирт, петролейный эфир и пентан. Температурные пределы применения этих жидкостей и их средние коэффициенты объемного теплового расширения приведены в таблице 17.6. Стекло по ГОСТ 1224-71.

Таблица 17.6 - Температурные пределы применения этих жидкостей и их средние коэффициенты объемного теплового расширения.

Термометрическая жидкость	Температурный предел применения, °С	Средний коэффициент объемного теплового расширения	Нижний верхний истинный видимый
Ртуть	-35+750(+1200)	0,00018	0,00016
Керосин	-20+300	0,00095	0,00093
Толуол	-80+100	0,00107	0,00107
Этиловый спирт	-80+70	0,00105	0,00103
Петролейный эфир	-120+25	0,00125	0,00150
Пентан	-200+20	0,00092	0,00090
Ртутно-таллиевая амальгама (Hg 91,5%, Tl 8,5%)	-59+20	0,00018	0,000016

В настоящее время все стеклянные жидкостные термометры изготавливаются только из термометрических стекол.

Лабораторные термометры.

Лабораторные термометры общего применения предназначены для измерений температур в различных лабораторных и производственных условиях. Существуют четыре вида лабораторных термометров, характеристики которых представлены в таблице 17.7.

Таблица 17.7 – основные характеристики лабораторных термометров.

Вид термометров	Температурная область применения	Температурный интервал шкалы, °С	Цена деления шкалы, °С	Допустимая погрешность показаний, °С*
I	10-60	15	4	0,01 ± 0,05
II	55-115	10	10	0,02 ± 0,1
III	140-300	8	20	0,05 ± 0,3
IV	300-500	4	50	0,1 ± 1,2

*) Указанные значения допустимых погрешностей действительны при вертикальном положении термометра и нормальном давлении.

Точные лабораторные стеклянные ртутные термометры изготавливаются с большой длиной градусного интервала и малой ценой деления: 0,01; 0,02; 0,05 и 0,1°С.

Технические термометры.

Технические термометры общего применения предназначены для измерения температур в самых различных отраслях производства. По форме нижней части технические термометры делятся на прямые и угловые - с углом

изгиба 90 и 135 градусов. Допускаемая погрешность показаний технических термометров равна цене деления. Более подробно следует остановиться на характеристике электроконтактных термометров. По конструкции электроконтактные термометры делятся на два типа:

1) ТЗК, замыкающие и размыкающие электрические цепи при одной, двух или трех заданных и определенных для каждого данного термометра температурах;

2) ТПК с магнитной регулировкой контакта, замыкающие электрические цепи при любой температуре в пределах шкалы термометра.

Большинство термометров имеют вложенную шкалу, термометр ТС-12 и психрометры ПБУ-1М, ПС-14 - - прикладную, термометр ТЛ-3 - - палочного типа. Термометры кагатный ТС-5 и буртовой ТС-9 выпускаются соответственно в металлической и деревянной оправах. Термометр ТЛ-15 заполнен петролейным эфиром, а термометры ТП-10, ТП-11, ТС-2, ТС-3, ТС-4, ТС-5, ТС-7, ТС-8, ТС-9 -- толуолом, окрашенным в красный цвет.

Проверка термометров перед установкой

Перед установкой на технологическом оборудовании жидкостные стеклянные термометры расширения должны пройти стендовую поверку: внешний осмотр, поверку показаний и поверку постоянства показаний.

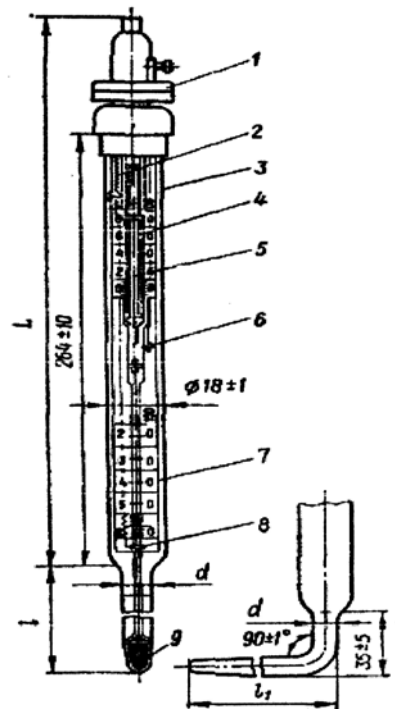
При внешнем осмотре проверяют: целостность стеклянной оболочки термометра и капилляра; закрепление шкалы (не должна перемещаться) и четкость надписей на ней; отсутствие разрывов столбика жидкости в капилляре и следов испарившейся жидкости на его стенках; состояние выводов электрических контактов для электроконтактных термометров.

При поверке жидкостных стеклянных термометров расширения используют термостат, в который погружают поверяемый термометр и образцовый термометр более высокого класса точности. Показания отсчитывают после легкого постукивания по термометрам.

Постоянство показаний термометра поверяют путем поверки положения его нулевой точки перед основной поверкой и сразу после нее, то есть после нагрева термометра до максимальной температуры. Постоянство показаний термометров, не имеющих нулевой точки, поверяют по нижней оцифрованной отметке шкалы.

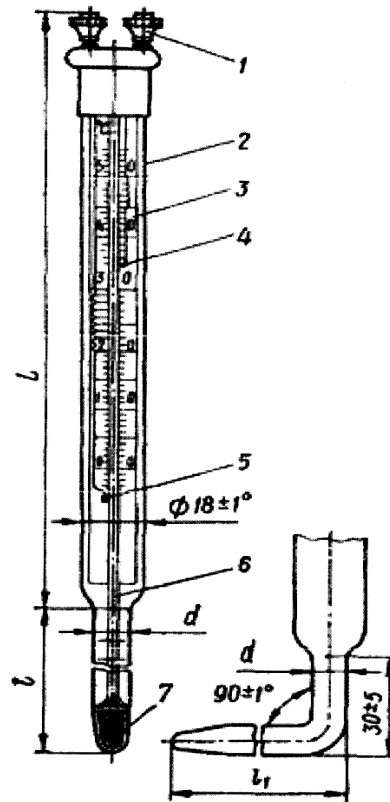
К числу устранимых дефектов жидкостных стеклянных термометров расширения относят разрыв столбика жидкости в капилляре и наличие следов испарившейся термометрической жидкости на стенках капилляра. Для устранения этого дефекта термометр подвергают шестикратному нагреванию до максимальной температуры. Если при этом налет на стенках капилляра не исчезнет или обнаружится неустранимый разрыв столбика жидкости, то термометр заменяют новым. В некоторых случаях удастся устранить дефекты, связанные с окислением контактов или разрывами электрической цепи электроконтактных термометров.

Жидкостные стеклянные термометры расширения, у которых при стендовой поверке выявлены неустранимые дефекты, признают негодными для дальнейшего использования и не ремонтируют.



1 — постоянный магнит; 2 — медный провод; 3 — оболочка; 4 — верхняя шкала; 5 — микровинт; 6 — подвижный контакт; 7 — нижняя шкала; 8 — неподвижный контакт; 9 — резервуар; l — длина нижней части; L — длина верхней части; l_1 — длина изогнутой части; d — диаметр нижней части.

Рисунок 17.40 - Термоконтатор с подвижным контактом



1 — зажим; 2 — оболочка; 3 — шкала; 4, 5 — контакты; 6 — капилляр; 7 — резервуар; l — длина нижней части; L — длина верхней части; l_1 — длина изогнутой части; d — диаметр нижней части.

Рисунок 17.41- Термоконтатор с заданным контактом.

17.2 Средства контроля

Контроль — это процесс где определения соответствия значения параметров изделия соответствуют установленным требованиям или нормам. Сущность всякого контроля состоит в проведении двух основных этапов. На первом из них получают информацию о фактическом состоянии некоторого объекта, о признаках и показателях его свойств. Эта информация называется *первичной*. На втором — первичная информация сопоставляется с заранее установленными требованиями, нормами, критериями. При этом выявляется соответствие или несоответствие фактических данных требуемым нормам. Информация об их расхождении называется *вторичной*. Она используется для выработки соответствующих решений по поводу объекта контроля. В ряде случаев граница между этапами контроля неразличима. При этом первый этап может быть выражен нечетко или практически не наблюдаться. Характерным примером такого рода является контроль размера детали калибром, сводящийся к операции сопоставления фактического и предельно допустимого значений параметра.

Контроль состоит из ряда элементарных действий: измерительного преобразования контролируемой величины; операции воспроизведения нормы процедуры контроля; операции сравнения; определения результата контроля.

Измерения и контроль тесно связаны друг с другом, близки по своей информационной сущности и содержат ряд общих операций (например, сравнение, измерительное преобразование). В то же время их процедуры во многом различаются:

- результатом измерения является количественная характеристика, а контроля — качественная;
- измерение осуществляется в широком диапазоне значений измеряемой величины, а контроль — обычно в пределах небольшого числа возможных состояний;
- контрольные приборы, в отличие от измерительных, применяются для проверки состояния изделий, параметры которых заданы и изменяются в узких пределах;
- основной характеристикой качества процедуры измерения является точность, а процедуры контроля — достоверность.

Контроль может быть классифицирован по ряду признаков.

В зависимости от числа контролируемых параметров он подразделяется на *однопараметровый*, при котором состояние объекта определяется по размеру одного параметра, и *многопараметровый*, при котором состояние объекта определяется размерами многих параметров.

По форме сравниваемых сигналов контроль подразделяется на *аналоговый*, при котором сравнению подвергаются аналоговые сигналы, и *цифровой*, при котором сравниваются цифровые сигналы.

В зависимости от вида воздействия на объект контроль подразделяется на *пассивный*, при котором воздействие на объект не производится, и *активный*, при котором воздействие на объект осуществляется посредством специального генератора тестовых сигналов.

В практике большое распространение получил так называемый *допусковый* контроль, суть которого состоит в определении путем измерения или испытания значения контролируемого параметра объекта и сравнение полученного результата с заданными граничными допустимыми значениями. Частным случаем допускового контроля является поверка средств измерений, в процессе которой исследуется попадание погрешностей средства измерений в допускаемые пределы.

По расположению зоны контролируемого состояния различают допусковый контроль состояний:

- ниже допускаемого значения $X < X_n$;
- выше допускаемого значения $X > X_v$;
- между верхним и нижним допускаемыми значениями $X_n < X < X_v$.

Результатом контроля является не число, а одно из взаимоисключающих утверждений:

- «контролируемая характеристика (параметр) находится в пределах допускаемых значений», результат контроля — «годен»;

- «контролируемая характеристика (параметр) находится за пределами допускаемых значений», результат контроля — «не годен» или «брак».

Для определенности примем, что решение «годен» должно приниматься, если выполняется условие $X_n \leq X \leq X_v$, где X , X_v , X_n — истинное значение и допускаемые верхнее и нижнее значения контролируемого параметра. На самом же деле с допускаемыми значениями X_v и X_n сравнивается не истинное значение X (поскольку оно неизвестно), а его оценка X_o , полученная в результате измерений. Значение X_o отличается от X на величину погрешности измерения: $X = X_o + \Delta$. Решение «годен» при проведении контроля принимается в случае выполнения неравенства $X_n \leq X_o \leq X_v$. Отсюда следует, что при допусковом контроле возможны четыре исхода.

1. Принято решение «годен», когда значение контролируемого параметра находится в допускаемых пределах, т.е. имели место события $X_n \leq X \leq X_v$ и $X_n \leq X_o \leq X_v$. Если известны плотности вероятностей законов распределения $f(X)$ контролируемого параметра X и погрешности его измерения $f(\Delta)$, то при взаимной независимости этих законов и заданных допустимых верхнем и нижнем значениях параметра вероятность события «годен»

$$P_{\text{г}} = \int_{x_n}^{x_v} f(x) \left[\int_{x_n - x}^{x_v - x} f(\Delta) d\Delta \right] dx ,$$

2. Принято решение «брак», когда значение контролируемого параметра находится вне пределов допускаемых значений, т.е. имели место события $X < X_n$ или $X > X_v$ и $X_o < X_n$ или $X_o > X_v$. При оговоренных допущениях вероятность события «негоден» или «брак»

$$P_{\text{нг}} = \int_{-\infty}^{x_n} f(x) \left[\int_{-\infty}^{x_n - x} f(\Delta) d\Delta + \int_{x_v - x}^{\infty} f(\Delta) d\Delta \right] dx + \\ + \int_{x_v}^{\infty} f(x) \left[\int_{-\infty}^{x_n - x} f(\Delta) d\Delta + \int_{x_v - x}^{\infty} f(\Delta) d\Delta \right] dx ,$$

3. Принято решение «брак», когда истинное значение контролируемого параметра лежит в пределах допускаемых значений, т.е. $X_o < X_n$ или $X_o > X_v$ и $X_n \leq X \leq X_v$ и забракован исправный объект. В этом случае принято говорить, что имеет место ошибка I рода. Ее вероятность

$$P_1 = \int_{x_H}^{x_G} f(x) \left[\int_{-\infty}^{x_H - x} f(\Delta) d\Delta \right] dx + \int_{x_H}^{x_G} f(x) \left[\int_{x_G - x}^{\infty} f(\Delta) d\Delta \right] dx ,$$

4. Принято решение «годен», когда истинное значение контролируемого параметра лежит вне пределах допускаемых значений, т.е. имели место события $X < X_H$ или $X > X_B$ и $X_H \leq X_0 \leq X_B$ и неисправный объект признан годным. В этом случае говорят, что произошла ошибка II рода, вероятность которой

$$P_2 = \int_{-\infty}^{x_H} f(x) \left[\int_{x_H - x}^{x_G - x} f(\Delta) d\Delta \right] dx + \int_{x_G}^{\infty} f(x) \left[\int_{x_H - x}^{x_G - x} f(\Delta) d\Delta \right] dx ,$$

Очевидно, что ошибки I и II родов имеют разное значение для изготовителей и потребителей (заказчиков) контролируемой продукции. Ошибки I рода ведут к прямым потерям изготовителя, так как ошибочное признание негодным в действительности годного изделия приводит к дополнительным затратам на исследование, доработку и регулировку изделия. Ошибки II рода непосредственно сказываются на потребителе, который получает некачественное изделие. При нормальной организации отношений между потребителем и производителем брак, обнаруженный первым из них, приводит к рекламациям и ущербу для изготовителя.

Рассмотренные вероятности P_G , P_{HG} , P_1 и P_2 при массовом контроле партии изделий характеризуют средние доли годных, негодных, неправильно забракованных и неправильно пропущенных изделий среди всей контролируемой их совокупности. Очевидно, что $P_G + P_{HG} + P_1 + P_2 = 1$.

Достоверность результатов допускового контроля описывается различными показателями, среди которых наибольшее распространение получили вероятности ошибок I (P_1) и II (P_2) родов и риски изготовителя и заказчика (потребителя):

$$R_{изг} = \frac{P_1}{P_1 + P_{HG}} ,$$

$$R_{зак} = \frac{P_2}{P_2 + P_G} ,$$

Приведенные формулы позволяют осуществить целенаправленный поиск таких значений погрешности измерения, которые бы при заданных верхнем и нижнем значениях контролируемого параметра обеспечили бы допускаемые значения вероятностей ошибок I и II родов ($P_{1д}$ и $P_{2д}$) или

соответствующих рисков. Этот поиск производится путем численного или графического интегрирования. Следовательно, для рационального выбора точностных характеристик средств измерений, используемых при проведении контроля, в каждом конкретном случае должны быть заданы допускаемые значения $P_{1д}$ и $P_{2д}$.

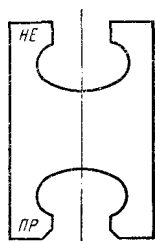
17.2.1 Калибры и шаблоны

Калибры, шаблоны предназначены для измерения детали по одному и тому же размеру и являются бесшкальными инструментами. Их особенно широко применяют в массовом и серийном производстве для контроля размеров, формы и взаимного расположения поверхностей.

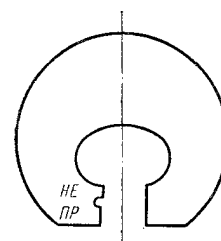
Предельные калибры.

Калибры для контроля валов — скобы (ГОСТ 2216—84*, 18355—73*).

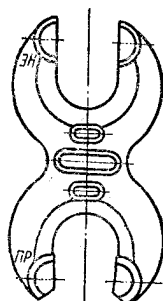
Проходная сторона (ПР) имеет размер, равный наибольшему предельному размеру вала, а непроходная (НЕ)—наименьшему предельному размеру вала.



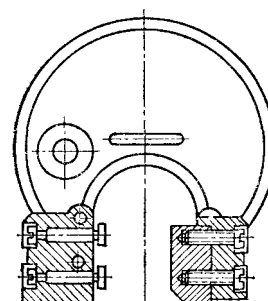
Скоба листовая двусторонняя от 1 до 50 мм



Скоба листовая односторонняя от 1 до 180 мм



Скоба штампованная двусторонняя от 3 до 100 мм



Скоба регулируемая от 0 до 330 мм

Рисунок 17.42 - Предельные калибры и их виды

Применение скоб.

Проходная сторона калибров (ПР) для валов должна проходить в проверяемую поверхность контролируемого размера, а непроходная (НЕ) не должна в нее проходить.

Измерительные поверхности калибров должны быть слегка смазанными.

Применение чрезмерных усилий при измерении приводит к неправильным показаниям и преждевременному износу измерительных поверхностей инструмента.

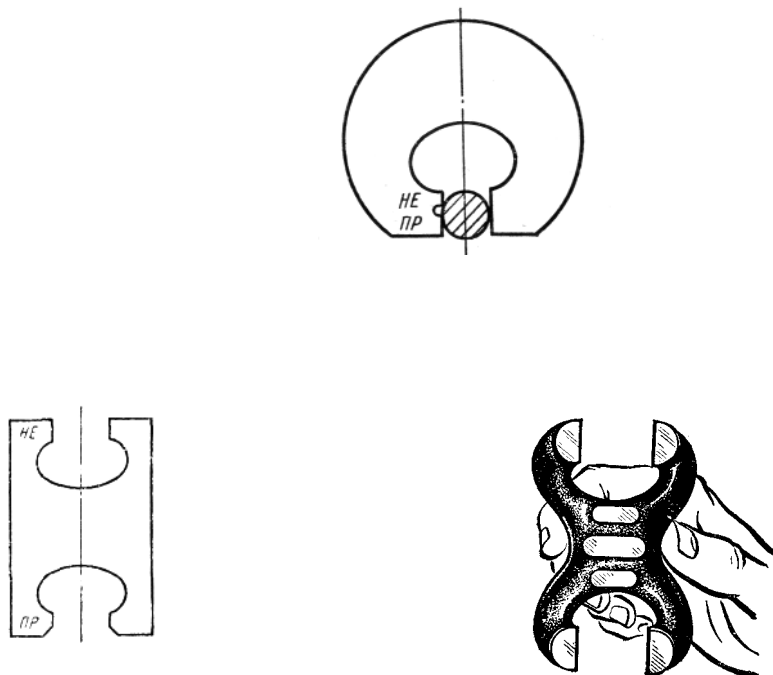
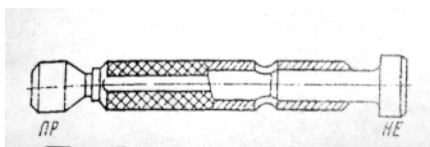


Рисунок 17.43 - Применение скоб

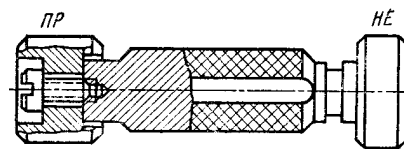
Калибры для измерения отверстий — пробки (ГОСТ 14807—69*, 14827—69*).

Типы пробок

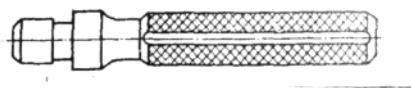
Проходная сторона (ПР) пробки имеет размер, равный наименьшему предельному размеру отверстия, а непроходная сторона (НЕ) — наибольшему предельному размеру отверстия.



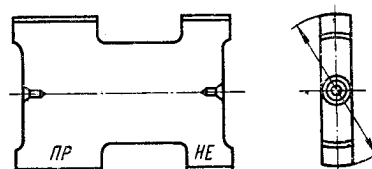
Пробка двусторонняя с вставками с коническим хвостовиком.
Пределы измерений от 1 до 50 мм



Пробка двусторонняя с насадками.
Пределы измерений от 30 до 100 мм



Пробка односторонняя с вставками с коническим хвостовиком.
Пределы измерений от 6 до 50 мм



Пробки листовые двусторонние.
Пределы измерений от 18 до 100 мм

Рисунок 17.44 - Калибры - пробки, их типы

Применение пробок.

Проходная сторона пробки (ПР) должна проходить в проверяемое отверстие, а непроходная сторона (НЕ) не должна проходить.

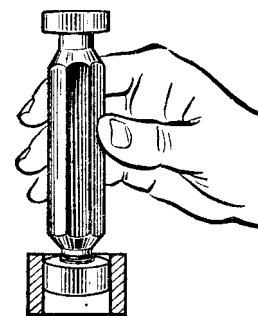
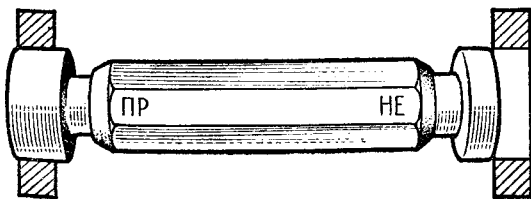


Рисунок 17.45 - Применение калибров – пробок

Шаблоны.

Шаблоны для контроля длин и высот.

Контроль длин и высот предельными шаблонами производится так же, как скобами и пробками, т. е. перемещением их измерительных поверхностей относительно проверяемых поверхностей деталей (изделий).

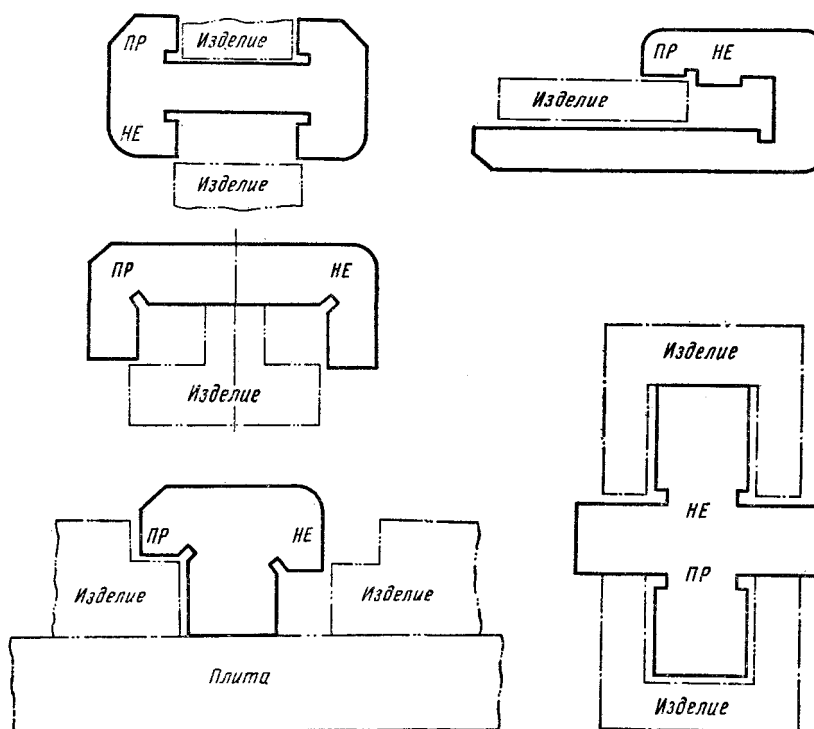


Рисунок 17.46 - Шаблоны длин и высот

Шаблоны радиусные.

Шаблоны радиусные предназначены для контроля вогнутых и выпуклых поверхностей. Радиусный шаблон представляет собой стальную пластину, конец которой выполнен по дуге определенного выпуклого или вогнутого радиуса. Выпуклые поверхности изделий контролируют вогнутыми шаблонами, вогнутые поверхности—выпуклыми шаблонами. Контроль производят сопряжением шаблона с проверяемой поверхностью: по величине и равномерности просвета судят о качестве обработки.

Применение радиусных шаблонов

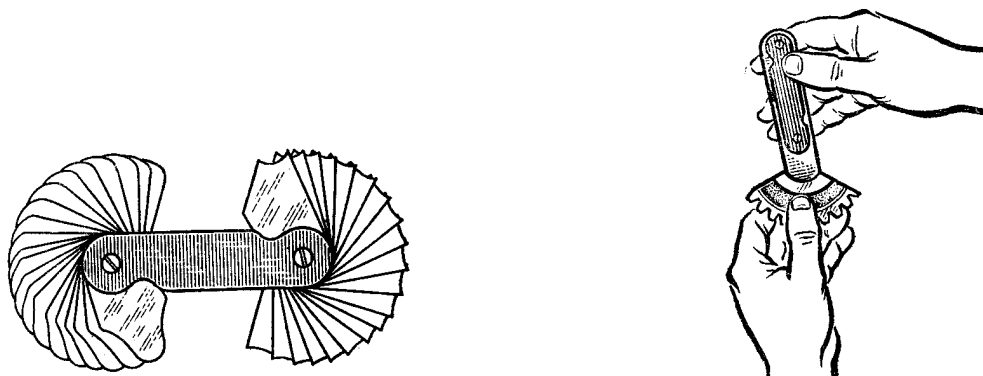
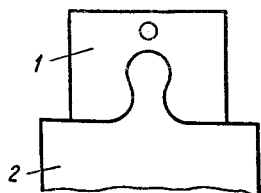


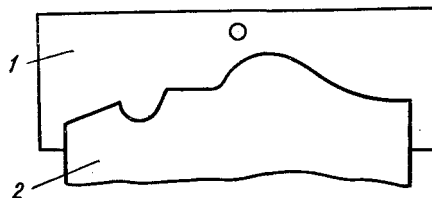
Рисунок 17.47 - Набор радиусных шаблонов

Шаблоны для контроля криволинейных поверхностей сложного профиля

Криволинейные поверхности сложного профиля контролируют шаблонами, контур рабочей части которых соответствует контуру проверяемых изделий.



1 — шаблон, 2 — изделие



1 — шаблон, 2 — изделие

Рисунок 17.48 - Шаблоны контроля криволинейных поверхностей

Приведенные средства измерения, испытания и контроля являются наглядным пособием некоторых элементарных способов в производственной практике.

Приводим некоторые средства, пригодные как в испытаниях, так и в контроле продукции и технологических операций.

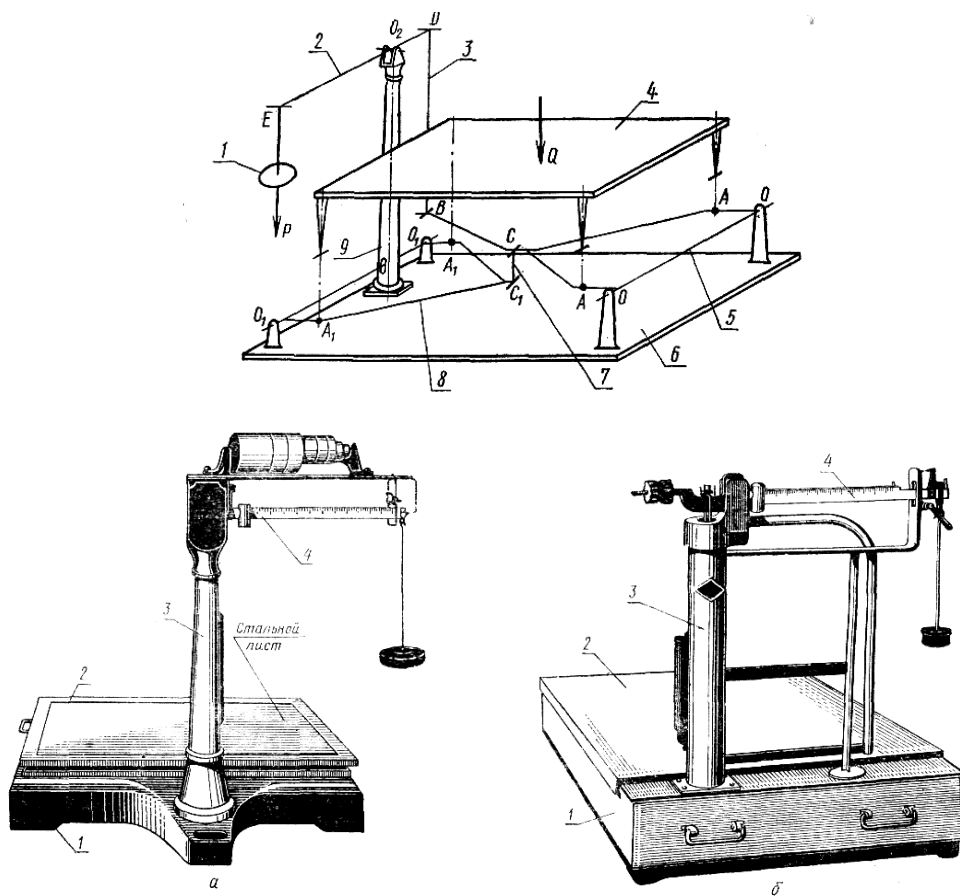


Рисунок 17.49 - Платформенные весы и их схемы

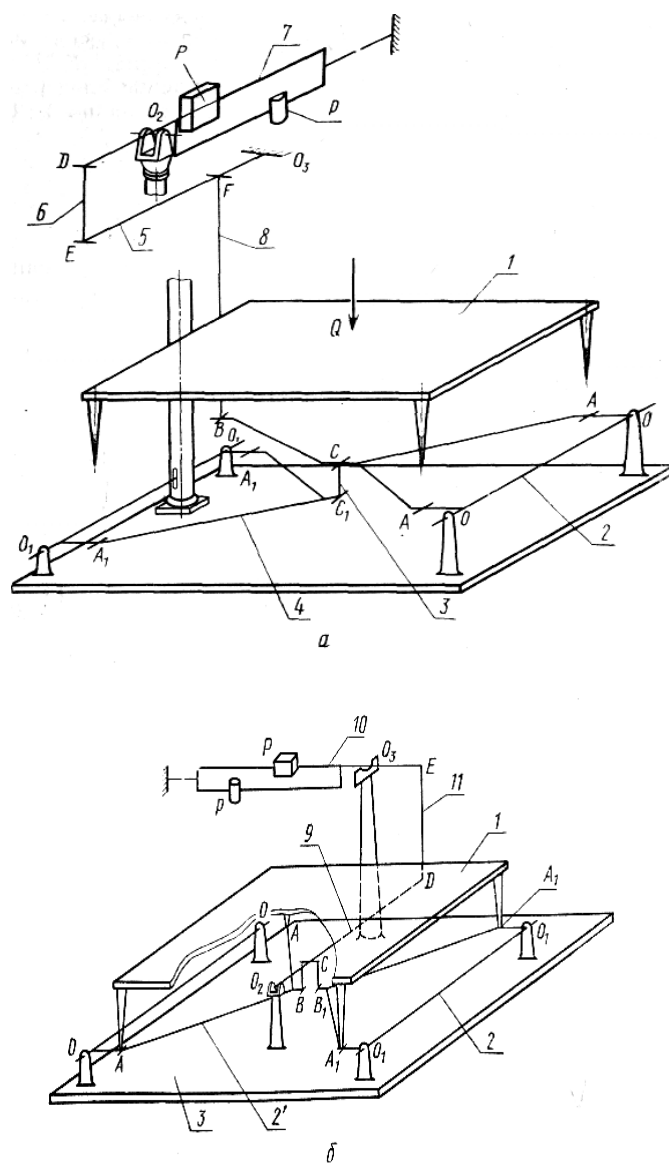


Рисунок 17.50 – Схема шкальных весов

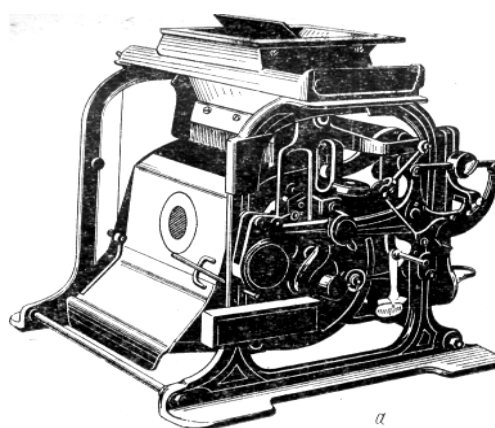
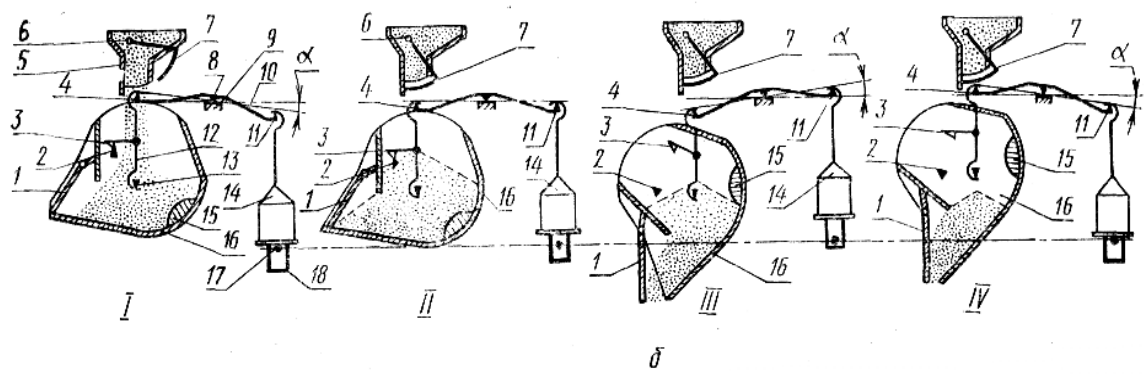


Рисунок 17.51 – Автоматические порционные весы



а- общий вид; б-схема.

Рисунок 17.51, лист 2

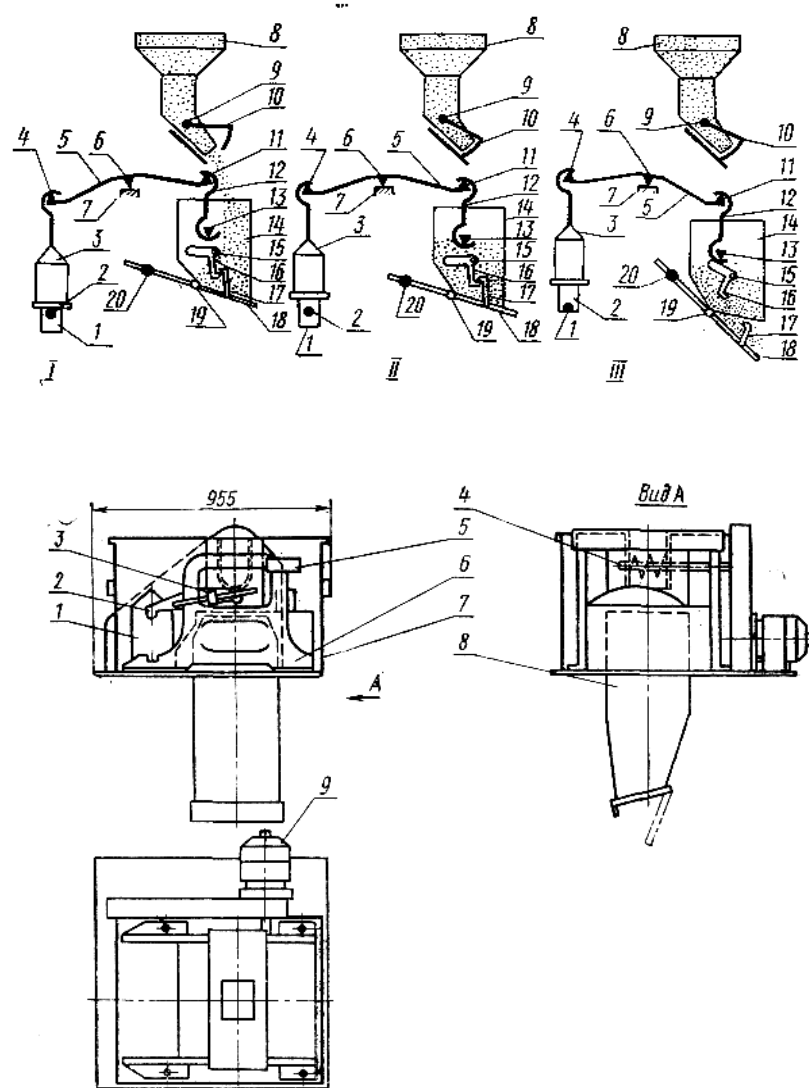


Рисунок 17.52 - Дозаторы различных типов

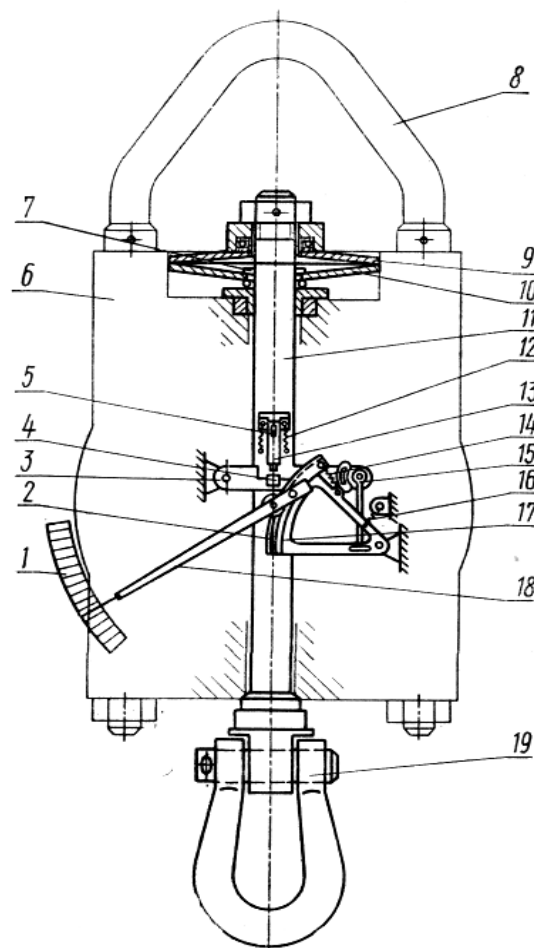
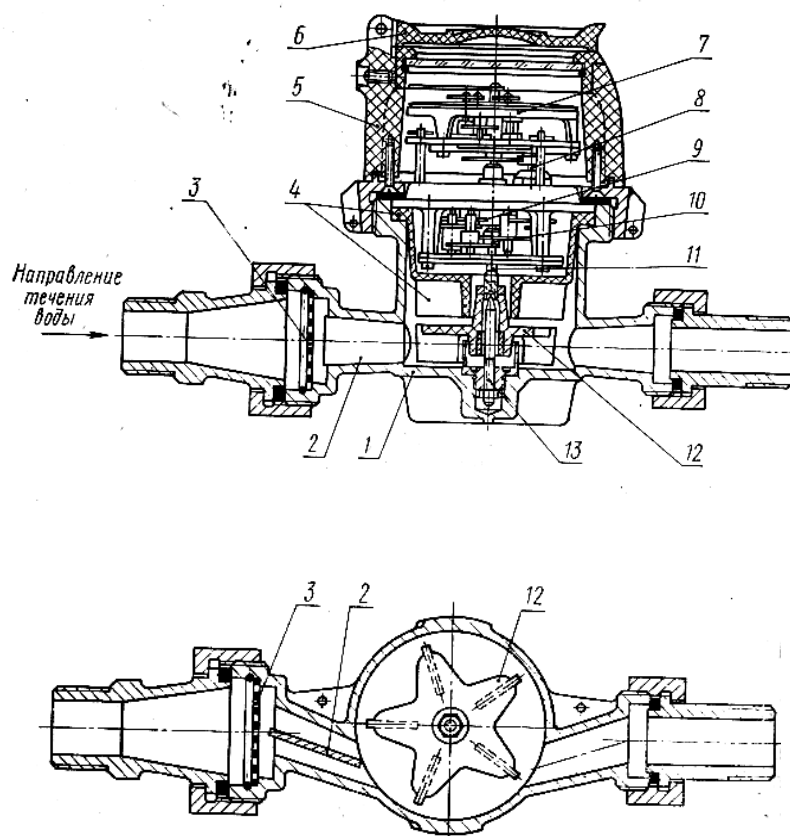


Рисунок 17.53 - Динамометрические весы кранового типа

Скоростные крыльчатые счетчики

В измерительной технике применяют несколько конструкций крыльчатых счетчиков. Эти счетчики в зависимости от поступления воды на крыльчатку разделяются на две модификации — многоструйные и одноструйные. Если счетный механизм прибора вместе с циферблатом находится в воде, счетчик называется мокроходом, а если над водой, протекающей через прибор, и отделен от нее герметичной перегородкой — сухоходом. Крыльчатые счетчики применяют для учета воды, используемой для бытовых нужд. Скоростной крыльчатый одноструйный счетчик сухоход показан на рисунке 17.54. При работе счетчика вода, поступающая в его корпус 1 по сужающему входному патрубку, направляется на лопасти крыльчатки 12, приводит ее во вращение и вытекает через выходной патрубок к месту потребления. Вращение крыльчатки через вертикальную ось 11 и укрепленную на ней трубку 10 передается шестеренчатому передаточному механизму-редуктору 9, а от него через передаточную ось 8 с сальниковым уплотнением — счетному механизму 7. Основные технические характеристики по расходу крыльчатых водосчетчиков, выпускаемых по ГОСТ 6019—83, приведены в таблице 17.8.



1 — корпус; 2 — струевыпрямитель; 3 — сетка; 4 — регулировочная чашка с подпорной пластиной; 5 — головка корпуса; 6 — защитная крышка; 7 — счетный механизм; 8 — ось с сальниковым уплотнением; 9 — передаточный механизм-редуктор; 10 — трибка; 11 — ось крыльчатки; 12 — крыльчатка; 13 — опорный шип.

Рисунок 17.54 - Скоростной, одноструйный с вертикальной крыльчаткой водосчетчик сухоход

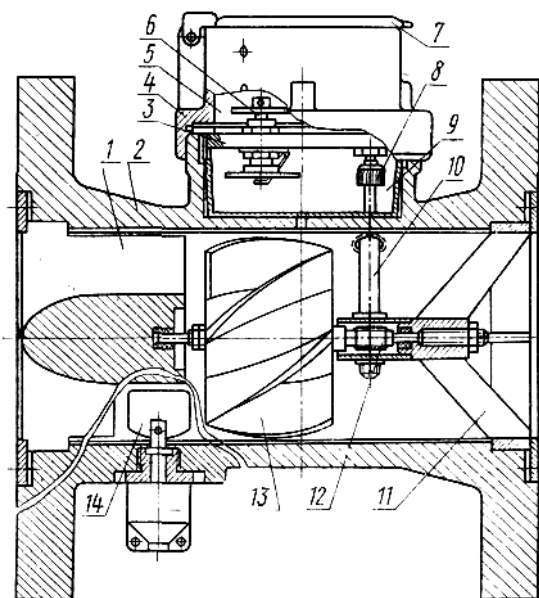
Таблица 17.8 - Основные технические характеристики по расходу крыльчатых водосчетчиков

Калибр, мм.	Пределы измерений по расходу, м ³ /ч		
	номинальный	наибольший	наименьший
15	1	1,5	0,06
20	1,6	2,5	0,1
32	3,2	5	0,25
40	6,3	10	0,4

Скоростные турбинные счетчики

Турбинные водосчетчики применяют для измерения количества воды, протекающей в магистральных трубопроводах, и воды, потребляемой промышленными предприятиями.

В зависимости от монтажа измерительного механизма счетчики изготавливают в двух исполнениях: с механизмом, смонтированным в корпусе прибора (для калибра 50 и 80 мм) и с выемным механизмом, смонтированным на съемной плите (для калибра 250 и 300 мм). Счетчики изготавливают также с механизмом, смонтированным либо в первом, либо во втором исполнении (для калибра 100, 150 и 200 мм).



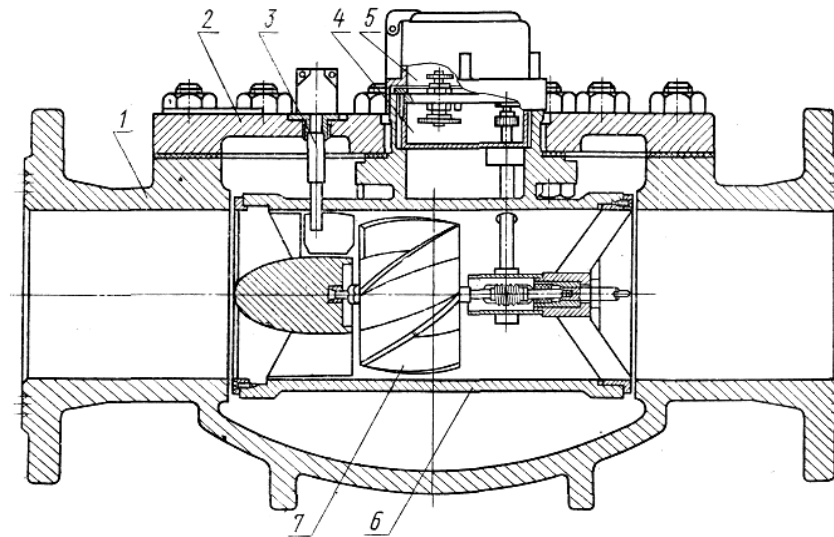
1 — струевыпрямитель; 2 — корпус; 3 — перегородка; 4 — головка; 5 — место счетного механизма; 6 — передаточная ось с сальниковым уплотнением; 7 — крышка; 8 — трибка; 9 — место редуктора; 10 — защитная трубка; 11 — крестовина; 12 — червячная пара; 13 — турбинка; 14 — регулировочная пластина

Рисунок 17.55 - Турбинный водосчетчик с измерительным механизмом, смонтированным в корпусе:

Поток воды, поступающий в водосчетчик с измерительным механизмом, смонтированным в корпусе (рисунок 17.55), выравнивается струевыпрямителем 1, направляется на турбинку 13 и, воздействуя на ее винтообразные лопасти, приводит турбинку во вращение. Вращение оси турбинки через червячную пару 12, вертикальную ось и трибку 10 передается механизму редуктора, а от него через передаточную ось с сальниковым уплотнением 6 — к счетному механизму.

Погрешность показаний регулируют, изменяя направление движения одной из струй, проходящей к турбинке через струевыпрямитель. Для этого одна из радиальных перегородок струе выпрямителя укорочена, а продолжением ее является поворачивающаяся извне пластина-регулятор 14. Поворот пластины в сторону вращения турбинки отклоняет в ту же сторону струю потока, которая подталкивает лопасти турбинки, сообщая ей

дополнительную угловую скорость. Поворот пластины в обратную сторону направляет струю против вращения турбинки, создавая тормозящее усилие.



1 — корпус; 2 — съемная плита; 3 — регулятор; 4 — место редуктора;
5 — место счетного механизма; 6 — цилиндрический патрубок-барабан;
7 — турбинка.

Рисунок 17.56 - Турбинный водосчетчик с измерительным механизмом, смонтированным на плите

Конструкция водосчетчика с измерительным механизмом, смонтированным на съемной плите (рисунок 17.56), позволяет извлекать механизм из корпуса 1 вместе с плитой 2 без отсоединения корпуса от трубопровода. В случае неисправности прибора или необходимости его проверки механизм вынимают из корпуса, а на его месте устанавливают новый.

Основные технические характеристики по расходу турбинных водосчетчиков приведены в таблице 17.9.

Для счетчиков калибром 50—150 мм расход установлен ГОСТ 14167-83.

Таблица 17.9 - Основные технические характеристики по расходу турбинных водосчетчиков

Калибр, мм	Пределы измерений по расходу, м ³ /ч			
	номинальный	наибольший		наименьший
		пиковый	эксплуатационный	
50	20	30	15	1,6
80	65	100	42	3,0
100	110	150	70	4,5
150	275	300	150	7,0
200	—	600	—	—
300	—	1500	—	—

Объемные счетчики с овальными шестернями

На рисунке 17.57 показана измерительная камера счетчика с овальными шестернями. В камере на горизонтальных осях расположены две овальные шестерни, принудительно связанные между собой зубчатым зацеплением. При протекании жидкости через камеру шестерни вращаются под действием разности давлений перед камерой и за ней, а также крутящих моментов, возникающих вследствие овальной формы шестерен. За полный оборот обе шестерни перемещают через камеру объем жидкости, определяемый объемом этой камеры.

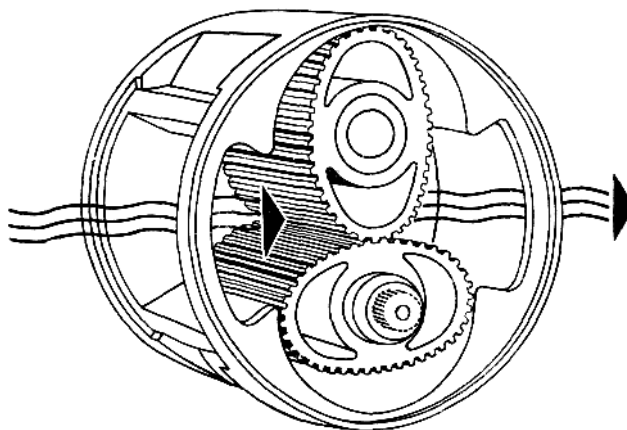


Рисунок 17.57 - Измерительная камера счетчика с овальными шестернями

На рисунке 17.58 показана в разрезе одна из конструкций счетчика с овальными шестернями — счетчик с условным обозначением СВШ-5.

В корпусе 4 размещена измерительная камера 5 с двумя овальными шестернями 7 и 5, насаженными на оси 6, закрепленные в днище камеры. Передача вращения шестерен через стенку 9, изолирующую счетный механизм, размещенный в головке 2, от жидкости, заполняющей измерительную камеру,

осуществляется магнитной муфтой 10. Ведущий магнит этой муфты укреплен в торце шестерни 7, а ведомый — на оси, связывающей муфту через редуктор 3 со счетным механизмом 1, заключенным в головке 2.

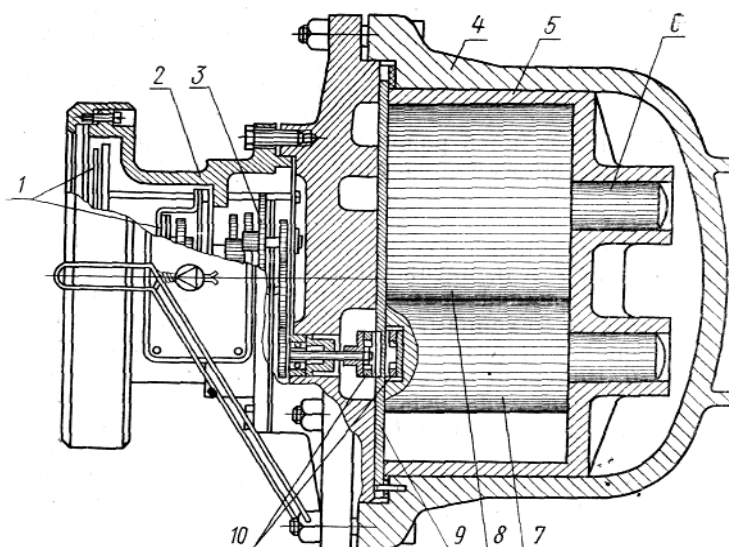


Рисунок 17.58 - Счетчик с овальными шестернями

Передача вращения шестерен к указанным механизмам может быть осуществлена также через ось, связанную с одной из шестерён и уплотненную в месте ее прохода через разделительную стенку. На рисунке 17.59 показано несколько положений овальных шестерен, поясняющих принцип измерения и действия счетчика.

В положении 1 правая шестерня отсекает некоторый объем жидкости в полости 1. Разность давлений, действуя на обе шестерни, создает крутящий момент только на правой шестерне, поворачивающий ее по часовой стрелке. Крутящий момент левой шестерни равен нулю, так как на ее плечи действуют равные усилия. Так как шестерни находятся в зацеплении правая шестерня, поворачиваясь, будет вращать левую шестерню против часовой стрелки.

В положении 2 левая шестерня заканчивает отсекание объема жидкости в полости 2, а правая начинает вытеснять объем жидкости из полости 1. В этом положении шестерен крутящий момент действует на обе шестерни.

В положении 3 ведущей является левая шестерня, которая к этому моменту отсекает объем в полости 2 и на которую действует крутящий момент. Эта шестерня, поворачиваясь против часовой стрелки, вращает правую по часовой стрелке.

В положении 4 правая шестерня заканчивает отсекание объема жидкости в полости 1, а левая начинает вытеснять объем жидкости из полости 2.

В положении 5 полностью отсечен объем в полости 1, обе шестерни сделали пол-оборота, и ведущей стала опять правая шестерня.

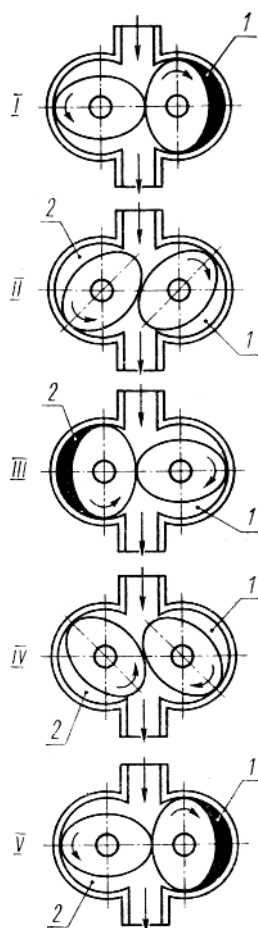


Рисунок 17.59 - Схема, поясняющая принцип действия счетчика с овальными шестернями

За один полный оборот шестерен измерительные полости камеры (черненные) два раза заполняются и два раза опорожняются. Объем четырех доз жидкости, вытесненной из этих полостей, и составляет измерительный объем камеры счетчика.

Счетчики с овальными шестернями можно применять для измерения количества жидких горючесмазочных материалов, сжиженных газов, различных масел, кислот и др. Технические характеристики по расходу счетчиков с овальными шестернями приведены в таблице 17.10. В пределах указанных расходов точность показаний всех этих счетчиков составляет $\pm 0,5\%$.

Таблица 17.10 - Технические характеристики по расходу счетчиков с овальными шестернями

Счетчик	Пределы измерений по расходу, М ³ /ч		
	номинальный	наибольший	наименьший
1	2	3	4
СВИШ-5	5	15	1,5

Продолжение таблицы 17.10

1	2	3	4
СВШС-40	6,5	20	3
СВШС-25	1,7	4	0,8
СШМ-80	20	60	6
ШЖУ-40	7,0	10,5	2,1

Объемные счетчики с кольцевым поршнем.

Счетчики с кольцевым поршнем применяют для измерения количества холодной и горячей воды, горючих жидкостей, масел сжиженных газов. В случае применения в конструкции счетчика магнитной муфты, передающей перемещение поршня счетному механизму, счетчик можно использовать для измерения количества кислот, щелочей, а также некоторых пищевых продуктов вина, молока, соков. Малые погрешности показаний и их постоянство позволяют применять этот счетчик в качестве образцового средства при определении вместимости и поверке автомобильных и железнодорожных цистерн и разного рода резервуаров. Один из вариантов устройства гидравлического узла счетчика с кольцевым поршнем показан на рисунке 17.60.

Основными частями узла являются измерительная камера 8 и поршень 10, заключенные в корпусе 2. Счетный узел прибора, состоящий из редуктора и счетного устройства, заключенных в счетную головку (на рисунке не показан), установлен на крышке 6.

При работе счетчика жидкость, поступающая в измерительную камеру 8 через входной патрубок и предохранительную сетку 3, оказывает давление на стенки кольцевого поршня и вследствие разности давлений на входе 14 в измерительную камеру 8 и выходе 12 из нее создает усилие, перемещающее поршень. Поршень 10, двигаясь по камере, за каждый цикл своего перемещения вытесняет из нее определенный объем жидкости.

Измерительная камера состоит из двух частей: нижней, в которой размещен поршень, и верхней — крышки. Полость камеры представляет собой цилиндр, в днище и крышке которого расположены соосно два цилиндрических выступа 9, направленных открытыми сторонами навстречу друг другу. На дне камеры, в центре, установлена ось с направляющим роликом 1. Внутри камеры имеется радиальная перегородка 13, отделяющая входное отверстие 14 для жидкости от выходного 12. Перегородка врезана в стенки камеры и ее внутренних цилиндрических выступов, а также в крышку и днище камеры и препятствует непосредственному перетеканию жидкости из входного отверстия к выходному. Поток может пройти от одного отверстия к другому только при перемещении поршня. В центре крышки имеется отверстие для прохода приводного валика, снабженного в нижней части поводком 5, а в верхней — трибкой 7.

Поршень 10 представляет собой кольцевой цилиндр с поперечной горизонтальной стенкой, разделяющей его на две половины. В центре перегородки расположены выступы 4 и имеется ряд отверстий для сообщения между собой нижней и верхней полос поршня. В поршне сделана радиально направленная прорезь 11.

Поршень в измерительной камере устанавливают так, чтобы прорезь 11 входила радиальная перегородка 13, а нижний выступ 4 размещался в кольцевой полости, образованной стенкой нижнего выступа 9 камеры и направляющего ролика 1. Таким образом, при работе счетчика выступ поршня может совершать только круговое движение, а сам поршень — только возвратно-поступательное.

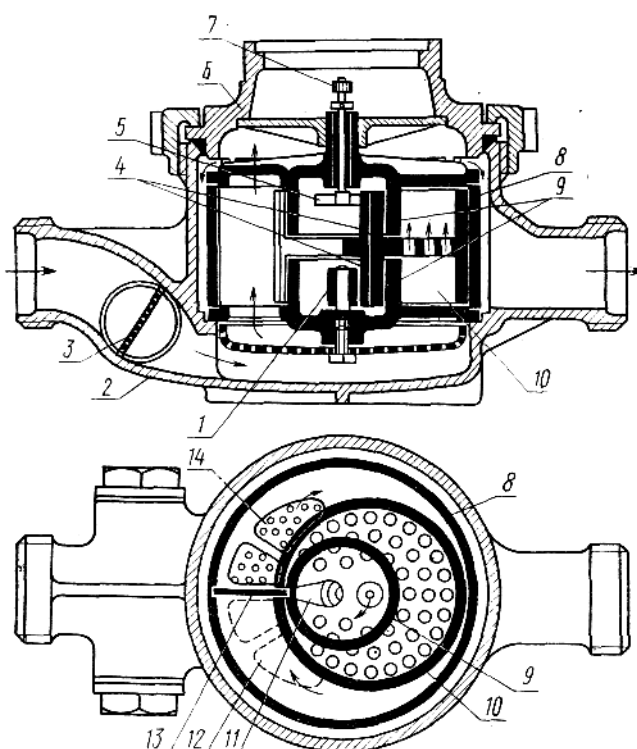
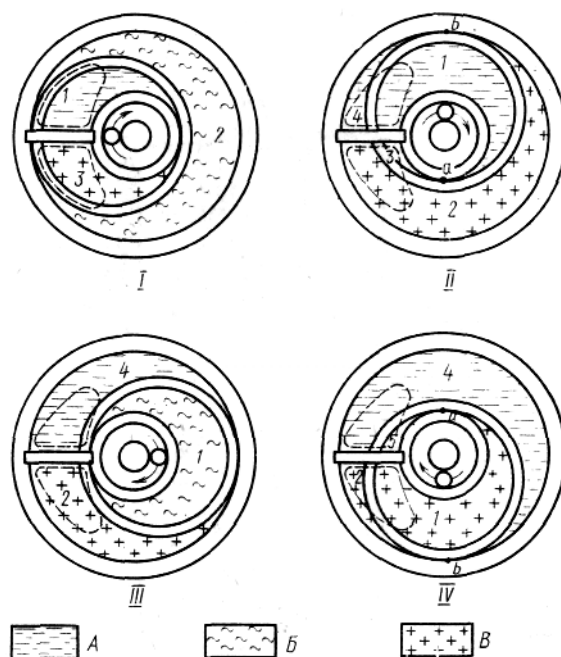


Рисунок 17.60 - Гидравлический измерительный узел счетчика с кольцевым поршнем

В результате сочетания этих двух движений создается качательное движение поршня, аналогичное движению кривошипно-шатунного механизма. При перемещении поршня его верхний выступ 4, соприкасаясь с поводком 5, приведет во вращение валик трибку 7 и передаст таким образом перемещение редуктору и связанному с ним счетному механизму. Размеры камеры и поршня согласованы так, что при установке поршня в камере его наружная поверхность прилегает к стенке камеры, внутренняя поверхность к стенке цилиндрических выступов, а прорезь к перегородке. При этом зазоры между местами прилегания поршня к камере составляют доли миллиметра.

Принцип работы счетчика показан на рисунке 17.61. Перемещающийся в камере кольцевой поршень изображен в четырех положениях сдвинутых одно по отношению к другому на 90° .



A — входящая жидкость; *Б* — замкнутая жидкость; *В* — выходящая жидкость

Рисунок 17.61 - Схема, поясняющая принцип действия счетчика с кольцевым поршнем

В положении *I* ось поршня расположена на линии перегородки, кольцо поршня касается камеры у основания перегородки. Измерительная камера разделена кольцевой стенкой поршня на отдельные полости *1*, *2* и *3*. Полость *1* сообщается с отверстием входа жидкости, а полость *3* — с отверстием ее выхода. Полость *2* замкнута стенками кольца и камеры и не имеет сообщения с отверстиями входа и выхода жидкости. При работе счетчика и поступлении жидкости в измерительную камеру давление в полости *1* будет больше, чем в полости *3*. Жидкость, заключенная в полости *2*, давит равномерно на наружную поверхность поршня, поэтому перемещение поршня происходит только вследствие разности давлений в полостях *1* и *3*. Эта разность давлений приложена к внутренней поверхности полукольца поршня, примыкающего к полости *1*, заставляет кольцо перемещаться в направлении движения часовой стрелки и вытеснять жидкость сначала из полости *3*, а затем из полости *2*.

В положении *2* ось поршня повернулась на 90° по отношению к положению *1*, объем полости *1* увеличился, а объемы полостей *2* и *3* уменьшились. Образовалась новая полость *4*. Жидкость входит в полости *1* и *4*, а выходит из полостей *2* и *3*. Давление в полости *1* больше, чем в полости *2*, поэтому разность давлений, приложенных к правому полукольцу поршня на

участке *ва*, заставляет ось кольца перемещаться в прежнем направлении. При этом перемещении будет продолжаться заполнение полостей *1* и *4* и вытеснение жидкости из полостей *2* и *3*.

В положении *3* ось поршня находится на линии перегородки, и кольцо поршня касается камеры в наиболее удаленной от перегородки точке. Произошло дальнейшее увеличение объемов полостей *1* и *4*, причем объем полости *1* достиг своей наибольшей величины и уменьшение объемов полостей *2* и *3* — объем полости *3* сократился до нуля. Давление в полости *4*, сообщаемой с отверстием входа жидкости, больше чем в полости *2*, сообщаемой с отверстием выхода жидкости. Разность давлений в полостях *4* и *2*, приложенная к наружной поверхности кольца, заставляет его ось перемещаться в направлении, указанном стрелкой. При дальнейшем перемещении будет продолжаться заполнение жидкостью полости *4* и вытеснение жидкости сначала только из полости *2*, а затем и из полости *1*.

В положении *4* поршень повернулся на 90° по отношению к положению *3*. Произошло дальнейшее увеличение объема полости *4*, уменьшение объемов полостей *1* и *2* и образование новой полости *5*. Полости *4* и *5* сообщаются с отверстием входа жидкости, а полости *1* и *2* — с отверстием выхода. Так как давление в полости *4* больше, чем в полости *У*, то разность давлений, приложенная к правому полукольцу поршня на участке *ав*, заставляет поршень перемещаться по направлению движения часовой стрелки. При этом объемы полостей *4* и *5* будут увеличиваться, а полостей *1* и *2* — уменьшаться. К концу перемещения поршень займет исходное положение *1*, причем объем полости *4* достигнет своей наибольшей величины, а объем полости *2* сократится до нуля.

Таким образом завершается один измерительный цикл, на протяжении которого поршень вытесняет объем жидкости, теоретически равный сумме объемов полости *2* в положении *1* и полости *1* в положении *3*. Причем каждый из объемов *2* и *1* равен произведению серпообразной площади на высоту измерительной камеры.

Объемный счетчик с цилиндрическими поршнями

По разнообразию конструкций счетчики с цилиндрическими поршнями занимают одно из ведущих мест среди объемных счетчиков. Они отличаются числом, расположением и уплотнением поршней, конструкцией распределительного устройства и направлением действия жидкости на поршень.

В топливораздаточных и маслораздаточных колонках нашли широкое применение четырех поршневые счетчики. Гидравлический узел четырех поршневого счетчика с горизонтальным перемещением поршней, установленный в топливораздаточных колонках, показан на рисунке 17.62.

Счетчик состоит из четырехцилиндрового блока *1* и распределительной головкой *2*, поршней *10*, *13*, *15* и *16*, кулисно-кривошипного механизма, золотникового распределительного устройства и счетного механизма (на рисунке не показан).

Цилиндры блока расположены крестообразно. Каждый цилиндр закрыт крышкой и имеет канал, по которому жидкость подводится к полости, расположенной между поршнем и крышкой, и отводится из нее.

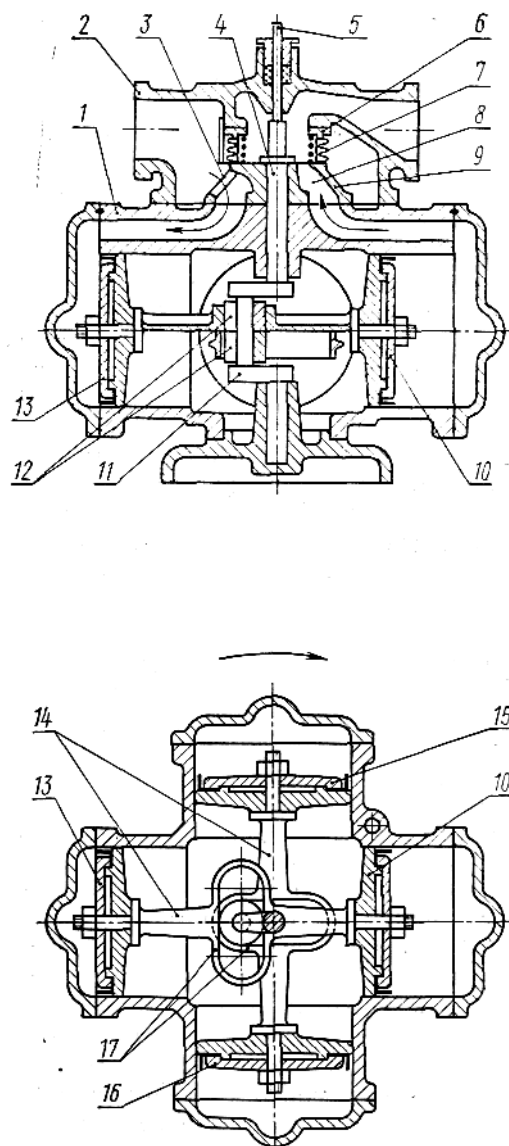


Рисунок 17.62 - Гидравлический измерительный узел четырех поршневого счетчика с горизонтальным перемещением поршней

Поршни размещены в цилиндрах блока, соединены между собой попарно штоками 14 кулис 2. Кулисы соединены между собой посредством роликов 12 и коленчатого вала 11, образуя кулисно-кривошипный механизм, преобразующий возвратно-поступательное движение поршней во вращательное. Распределительное устройство состоит из золотника 9, гофрированной цилиндрической пружины 7 с опорным кольцом 6 и цилиндрической многовитковой пружины, расположенной внутри гофрированной. Золотник выполнен в виде усеченного конуса и имеет в стенке отверстие 3 для подвода жидкости к полостям цилиндров и канал 5 для отвода ее. Нижняя плоскость золотника притерта к зеркалу средней части блока, а

верхняя плоскость кольца — к выпуску выходного канала распределительной головки. Герметичность мест прилегания создается над давлением двух указанных выше пружин. Золотник насажен на верхнюю шейку 4 коленчатого вала, с которым связан валик 5, передающий вращение счетному механизму.

В зеркале средней части блока имеются четыре отверстия, через которые жидкость последовательно поступает в каналы цилиндров или отводится из них в зависимости от положения отверстия и канала золотника.

При работе счетчика и положении поршней, показанном на рисунке 18.62, путь жидкости из входного патрубка к полости цилиндра перед поршнем 13 показан стрелкой. Второй стрелкой показан путь жидкости от полости перед поршнем 10 к отверстию выходного патрубка. Под действием разности давлений поршни 13 и 15 перемещаются в сторону поршней 10 и 16, находящихся под меньшим давлением. При перемещении происходит заполнение жидкостью полостей цилиндров перед поршнями 13 и 15 и вытеснение жидкости из полостей цилиндров перед поршнями 10 и 16. Перемещение поршней под действием кулисно-кривошипного механизма передается коленчатому валу 11, а через него золотнику, редуктору и счетному механизму прибора. Измерительный объем счетчика регулируют с помощью установленных в крышках цилиндров специальных винтов (на рисунке не показаны), действующих как вытеснители объема или как ограничители хода поршней.

17.2.2 Вибростенды

Переносной вибростенд серии ВСВ-131М

Внесен в Государственный реестр средств измерений № 26696-04. Предназначен для поверки и калибровки вибрационной аппаратуры в промышленных условиях. Вибростенд серии ВСВ-131М воспроизводит колебания заданного размаха виброперемещения или заданного среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости. Стенд надежно защищен от внешних вибраций. Дает возможность калибровать виброаппаратуру в непосредственной близости от работающих агрегатов без съема кабелей и металлоукавов. Позволяет калибровать практически любую виброаппаратуру, выпускаемую для промышленности, в том числе - устаревших типов. Вибростенд серии ВСВ-131М прошел Государственные испытания и занесен в Государственный Реестр. Выпускается уже более 8 лет. Не менее 300 вибростендов серии ВСВ-131М успешно эксплуатируются на предприятиях энергетики, нефтяной и газовой промышленности. Имеется взрывозащищенное исполнение ВСВ-131Ex с питанием от аккумуляторов и маркировкой 1ExibsIIBT4.



Рисунок 17.63 - Вибростенд ВСВ –131Ех

Таблица 17.11- Краткие технические характеристики ВСВ - 131 Ех

Наименование параметра	Значение
Габариты	240х235х290 мм
Масса	12 кг
Максимальная масса калибруемых датчиков	до 1 кг
Амплитуда виброускорения	0,02 ... 10 м/с ²
Амплитуда по СКЗ виброускорения	0,1...70 мм/с
Амплитуда по размаху виброперемещения	10 ... 500 мкм
Частота воспроизведения вибрации	45; 64; 79.6 Гц
Основная погрешность	менее 2%
Питание	220 В/50 Гц

НАЗНАЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЯ. Вибростенд переносной серии ВСВ-131М (далее по тексту – вибростенд) предназначен для поверки виброаппаратуры газоперекачивающих агрегатов. Вибростенд переносной серии ВСВ-131М имеет две модификации исполнения – обычное (ВСВ-131) и взрывозащищенное (ВСВ-131Ех). Указанные исполнения имеют идентичные основные технические характеристики и отличаются тем, что во взрывозащищенном исполнении стенда применены специальные конструкторские и схемные решения, обеспечивающие требуемый уровень взрывозащиты. Для поставок в России вибростенд ВСВ-131Ех выполнен с видом взрывозащиты "искробезопасные электрические цепи" уровня "ib" по ГОСТ Р 51330.10-99 и специальным видом защиты "s" по ГОСТ 22782.3, имеет маркировку взрывозащиты "IExibsIIBT4" и может применяться во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок

согласно гл. 7.3 ПУЭ (Правила устройства электроустановок). Для поставок в Украину вибростенд ВСВ-131Ех выполнен с видом взрывозащиты "искробезопасные электрические цепи" уровня "ib" по ГОСТ 22782.5-78 и специальным видом защиты "s" по ГОСТ 22782.3-77, имеет маркировку взрывозащиты "1ExibsIIBT4" и может применяться во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок согласно гл. 4 ПУЭ (Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок. ДНАОП 0.00-1.32-01). Вибростенд воспроизводит колебания заданного размаха виброперемещения, среднего квадратического значения виброскорости и амплитудного значения виброускорения.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ. Основные технические характеристики вибростенда указаны в таблице 17.12.

Таблица 17.12 - Основные технические характеристики вибростенда

Наименование параметра	Значение
1	2
Частоты воспроизводимой вибрации, Гц	45, 64, 79.6
Диапазон воспроизведения размаха виброперемещения при массе нагрузки до 1 кг, мкм:	
на частоте 45 Гц	20 - 50
на частоте 64 Гц	10 - 25
на частоте 79,6 Гц	5 - 0
Дискретность отсчета, мкм	
в диапазоне до 100 мкм	0,1
в диапазоне выше 100 мкм	1
Диапазон воспроизведения среднего квадратического значения виброскорости при массе нагрузки до 1 кг, мм/с:	
на частоте 45 Гц	2 - 25
на частоте 64 Гц	1 - 17,6
на частоте 79,6 Гц	0,5 - 14,14
Дискретность отсчета, мм/с	
в диапазоне до 10 мм/с	0,01
в диапазоне выше 10 мм/с	0,1

Продолжение таблицы 17.12

1	2
Диапазон воспроизведения амплитуды виброускорения при массе нагрузки до 1 кг не менее, м/с^2: на частоте 45 Гц на частоте 64 Гц на частоте 79,6 Гц	$0,2 \div 10$ $0,3 \div 10$ $0,3 \div 10$
Дискретность отсчета, м/с^2	0,1
Пределы допускаемой основной относительной погрешности воспроизведения амплитуды виброускорения, СКЗ виброскорости, размаха виброперемещения не более, %: на базовой частоте (45 Гц) на остальных частотах	2 3
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности воспроизведения частоты вибрации не более, Гц.	0,2
Нестабильность воспроизведенных параметров вибрации за время измерения (не более 0,5 мин.) при любом режиме измерений через 4 мин после включения не более, %	0,5
Коэффициент нелинейных искажений при максимальном значении виброускорения не более, %	1,0
Относительный коэффициент поперечных колебаний вибростола (по ускорению) не более, % на базовой частоте 45 Гц на остальных частотах	2,0 5,0
Электропитание вибростенда: для ВСВ-131: от сети, В/Гц для ВСВ-131Ех: от аккумуляторной батареи 10ТСМ4500А2СК, В	$220 \pm 22 / 50 \pm 1$ 12

Продолжение таблицы 17.12

1	2
Потребляемая мощность: без нагрузки не более, Вт	20
Вт при максимальной нагрузке не более,	30
Продолжительность непрерывной работы не менее, ч.	1
Дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры окружающего воздуха, не более °С	0,1

Вибростенды серии ВСВ-131М соответствуют требованиям технических условий ТУ 4277-031-00205435-01 и комплекту конструкторской документации согласно Иа2.781.013. Габаритные размеры не превышают 240x235x290 мм. Масса не превышает 16 кг без футляра и 17 кг с футляром.

Технические характеристики. Электропитание вибростенда во взрывозащищенном исполнении (ВСВ-131Ex) осуществляется от никель-металлгидридной аккумуляторной батареи типа 10ТСМ4500А2СК, номинальным напряжением 12 В и емкостью 4500 мАч через ограничитель напряжения и тока, обеспечивающим выходное напряжение не более 12,2 В и ток короткого замыкания не более 1,7 А. Электрическая изоляция между корпусом и изолированными от корпуса по постоянному току электрическими цепями, доступ к которым возможен без вскрытия вибростенда, выдерживает в течение 1 мин напряжения 1,5 кВ частотой 50 ± 1 Гц. Электрическое сопротивление изоляции между корпусом и изолированными по постоянному току электрическими цепями не менее 20 МОм. Вибростенд в транспортной таре выдерживает воздействие транспортной тряски с ускорением 30 м/с^2 при частоте ударов до 120 в минуту. Вибростенд изделие восстанавливаемое, ремонтируемое. Средняя наработка на отказ не менее 10000 ч. Установленная наработка на отказ не менее 1000 ч при доверительной вероятности 0,95. Среднее время восстановления работоспособности не более 6 ч. Полный средний срок службы не менее 10 лет. Установленный срок службы не менее 3 лет.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ. Обеспечение взрывозащищенности.

Взрывозащищенность вибростенда ВСВ-131Ex обеспечивается выполнением его с видами взрывозащиты искробезопасная электрическая цепь уровня "ib" по ГОСТ Р 51330.10-99 и специальным видом защиты "s" по ГОСТ 22782.3-77 для поставок в России. Для поставок в Украину взрывозащищенность вибростенда ВСВ-131Ex обеспечивается выполнением его с видами взрывозащиты "искробезопасная электрическая цепь" уровня "ib"

по ГОСТ 22782.5-78 и специальным видом защиты "s" по ГОСТ 22782.3-77. Искробезопасность электрических цепей вибростенда достигается следующими мерами и средствами: - ограничением тока короткого замыкания источника питания до допустимых значений по ГОСТ Р 51330.10-99 (для России) и ГОСТ 22782.5-78 (для Украины) за счет установки электронного ограничителя тока; - конструктивным выполнением источника питания, ограничителя тока и вибростенда в соответствии с ГОСТ Р 51330.0-99, ГОСТ Р 51330.10-99 (для России) и в соответствии с ГОСТ 22782.0 – 81 и ГОСТ 22782.5-78 (для Украины); - ограничением индуктивности и емкости схемы вибростенда до значений не превышающих допустимые; - наличием маркировки взрывозащиты и предупредительных надписей на корпусе вибростенда. Вид защиты "s" обеспечивается следующими мерами: заливкой неискробезопасной части схемы усилителя мощности терморезистивным компаундом; на клеммы для подключения к усилителю мощности катушки вибратора электродинамического после подключения проводов надеты термоусаживающиеся трубки:

- с целью исключения обрыва и возникновения искрений проводники, соединяющие усилитель мощности и катушку вибратора дублируются и имеют усиленную изоляцию;

- клеммная колодка для подключения проводников к вибратору вместе с проводниками залита герметиком;

- обмотка вибратора намотана проводом диаметром 0,67 мм и пропитана компаундом;

- температура нагрева обмотки не превышает допустимую по ГОСТ Р 51330.0-99 (для России) и по ГОСТ 22782.0-81 (для Украины);

- вибратор помещен в оболочку со степенью защиты от внешних воздействий не ниже IP44

Устройство и принцип работы вибростенда серии ВСВ-131М.

Блок-схема вибростенда приведена на рисунке 17.64

Генератор 1 вырабатывает переменное напряжение с фиксированными частотами 45, 64 и 79,6 Гц. Напряжение генератора поступает на вход усилителя мощности 3, к выходу которого подключена катушка возбуждения электродинамического возбудителя механических колебаний 4. Корпус возбудителя крепится к основанию вибростенда через подвесную систему с жесткостью c и коэффициентом затухания h . На подвижном столе возбудителя установлен пьезоэлектрический вибродатчик 5, вырабатывающий электрический сигнал, пропорциональный виброускорению. Сигнал с вибродатчика поступает на вход измерительного блока 6. По индикаторам измерительного блока 6 производится отсчет параметров воспроизводимых механических колебаний (размах виброперемещения, среднее квадратическое значение виброскорости, амплитуда виброускорения и частота).

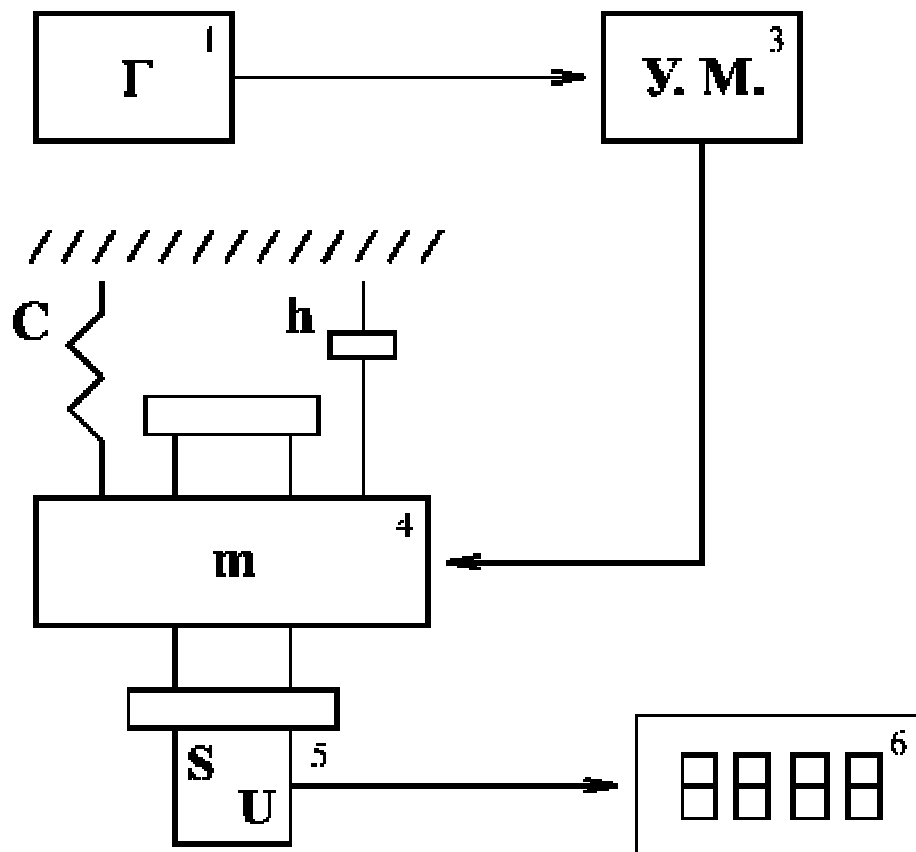


Рисунок 17.64 - Блок-схема переносного вибростенда.

Подвесная система возбуждителя предназначена также для уменьшения влияния внешних магнитных помех на погрешность калибровки и для уменьшения передачи колебаний от вибростола на основание. Для передачи колебаний на основание не более 2 % от колебаний вибростола собственная частота подвесной системы выбрана 8 Гц. Тем не менее, с целью снижения погрешности поверки виброаппаратуры следует стремиться обеспечить минимальное воздействие местной вибрации на вибростенд. В вибростенде применена электромеханическая обратная связь по виброускорению и виброскорости, которая позволяет корректировать собственную частоту подвесной системы крепления вибростола к корпусу возбуждителя (на рисунке эта подвесная система не показана). Обозначение и назначение органов управления и соединительных разъемов, расположенных на передней и задней панелях вибростенда, приведены в таблице 17.13.

Таблица 17.13 - Обозначение и назначение органов управления и соединительных разъемов

Обозначение	Назначение	Панель	Примечание
1	2	3	4
"ВКЛ." "I/O"	Включение питания	задняя	верхнее положение тумблера: при этом загорается светодиод над тумблером
“установка уровня вибрации”, “грубо”	Установка амплитуды вибрации	передняя	крайнее левое положение ручки соответствует минимальному значению амплитуды вибрации
“установка уровня вибрации”, “точно”	Точная подстройка при установке амплитуды вибрации	передняя	крайнее левое положение ручки соответствует минимальному значению
“частота, Гц”, “79,6”, “64”, “45”	При нажатой кнопке устанавливается частота колебаний 79,6, 64 или 45 Гц с погрешностью $\pm 0,2$ Гц	передняя	при соответствующей нажатой кнопке производится измерение виброускорения, виброскорости и виброперемещения
“1:10”	Переключение пределов измерения виброускорения, виброскорости и виброперемещения	передняя	пределы измерения при нажатой кнопке: виброускорение – 100 м/с^2 ; виброскорость – 100 мм/с ; виброперемещение – 1000 мкм ; при отжатой кнопке: виброускорение – 10 м/с^2 ; виброскорость – 10 мм/с ; виброперемещение – 100 мкм .
“ВЫХ. ЛИН.”	Разъем подключения входа осциллографа или измерителя нелинейных искажений для контроля формы колебаний, генерируемых вибростендом	передняя	Запрещается подключение приборов со входным сопротивлением менее 10 кОм .

Продолжение таблицы 17.13

1	2	3	4
“ВЫХ. СИНХР”	Разъем подключения входа осциллографа для контроля импульсов синхронизации, вырабатываемых схемой задающего генератора	передняя	может использоваться для подключения лазерного измерителя вибрации при поверке вибростенда.
“ВЫХ. ГЕНЕР”	Разъем подключения входа осциллографа для контроля напряжения, вырабатываемого встроенным задающим генератором.	задняя	
“ВХ. ВН. ГЕНЕР”	Разъем подключения выхода внешнего генератора	задняя	
“УСК”, “СК”, “ПЕР”	Переключение режимов измерения воспроизводимой вибрации	передняя	При соответствующей нажатой кнопке производится измерение виброускорения, виброскорости или виброперемещения.
“ГЕНЕР. ВНУТР.”	Включение внутреннего генератора возбуждения	задняя	

Вибростенд имеет систему автоматического контроля напряжения питания. Загорание точек во всех разрядах цифрового табло измерительного блока 6 (см. рисунок 17.64) информирует о заниженном уровне напряжения питания и, при питании вибростенда от аккумуляторной батареи, о необходимости произвести ее подзаряд. Несвоевременная зарядка батареи может привести к деградации ее емкости. Для зарядки аккумуляторной батареи она должна быть отстыкована от вибростенда. Зарядка батареи должна проводиться только вне взрывоопасной зоны. Зарядка аккумуляторной батареи должна осуществляться только от штатного зарядного устройства, поставляемого в комплекте со стендом.

Для зарядки аккумуляторной батареи зарядное устройство вначале следует подключить к разъему аккумуляторной батареи, а затем к сети 220 В, 50 Гц. Время заряда батареи составляет 12-15 часов. Использование не

штатного зарядного устройства при не соблюдении условий заряда, указанных в сопроводительном паспорте на батарею, может привести к деградации ее емкости.

Порядок работы:

1 Установите регулировочные ручки “установки уровня вибрации (“грубо” и “точно”) в крайнее левое положение, соответствующее установлению минимального уровня воспроизводимой вибрации;

2 Закрепите на вибростоле вибростенда поверяемый вибропреобразователь с помощью переходной шпильки;

3 Питание вибростенда осуществляется в следующем порядке: - для модификации ВСВ-131 – от сети переменного тока напряжением 220 В и частоты 50 Гц; - для модификации ВСВ-131Ех - от аккумуляторной батареи со встроенными элементами взрывозащиты. Подключите вибростенд к сети электропитания или убедитесь, что аккумуляторная батарея пристыкована к вибростенду (для модификации ВСВ-131Ех);

4 Установите расположенную на задней панели клавишу “ВКЛ” в верхнее положение. При этом должны загореться один из индикаторов “мм/с”, “м/с²”, или “мкм”, а также цифровые индикаторы. Убедитесь по показаниям индикатора в режиме измерения СКЗ виброскорости, что в месте расположения вибростенда серии ВСВ-131М вибрация основания, на котором он расположен, не превышает уровня минимальных воспроизводимых вибростендом значений.

5 Чтобы задать требуемую фиксируемую частоту воспроизведения колебаний 45, 64 или 79,6 Гц необходимо нажать соответствующую кнопку “частота”; “Гц”;

6 Установите при помощи кнопок “УСК”, “СК”, “ПЕР” требуемый режим измерения воспроизводимой вибрации. Режим измерения виброускорения устанавливается нажатием кнопки “УСК”, чему соответствует загорание светового индикатора “м/с²”. Режим измерения виброскорости устанавливается нажатием кнопки “СК”, чему соответствует загорание светового индикатора “мм/с”, а режим измерения виброперемещения устанавливается нажатием кнопки “пер”, чему соответствует загорание световой индикации “МКМ”. Пределы измерения виброускорения, виброскорости и виброперемещения установите кнопкой “1:10”. Нажатое положение кнопки задает пределы измерения виброускорения 100 м/с²; виброскорости 100 мм/с и виброперемещения 1000 мкм, а отжатое соответствует 10 м/с²; 10 мм/с и 100 мкм;

7 Для проведения измерения виброускорения, виброскорости и виброперемещения установите ручками “установка уровня вибрации” (“грубо” и “точно”) необходимую амплитуду вибрации, контролируемую по цифровому индикатору. При этом необходимо следить за тем, чтобы показания стрелочного указателя “ток нагрузки” не превышали 100 мкА, т.е. не выходили за последнюю риску шкалы;

8 После проведения измерения выключите вибростенд, клавишей “ВКЛ.”, а затем отсоедините вибропреобразователь;

9 При повторном включении стенда, если регуляторы амплитуды находятся не в нулевом положении, усилитель мощности включается плавно с задержкой 3-5 секунд, что устраняет ударное движение вибростола.

Методика поверки.

Настоящая методика поверки распространяются на вибростенд переносной серии ВСВ-131М (ТУ 4277-031-00205435-01), предназначенный для поверки виброизмерительной аппаратуры, и устанавливают методику его первичной и периодической поверки. Периодичность поверок – не реже 1 раз в год и после ремонта. Операции и средства поверки. При проведении поверки должны быть выполнены операции и применены средства поверки, указанные в таблице 17.14.

Таблица 17.14 - Операции и средства поверки.

Наименование операции	Номер пункта методических указаний	Наименование средства измерений	Обязательность операций	
			при выпуске из произв.	при эксплуатации и после ремонта
1	2	3	4	5
Проверка диапазонов воспроизведения размаха виброперемещения, среднего квадратического значения виброскорости, амплитуды виброускорения; определение основной погрешности воспроизведения размаха виброперемещения, виброускорения и среднего квадратического значения виброскорости.		Лазерный измеритель параметров вибрации 1 разряда по МИ 2070-90	да	да
Проверка коэффициента нелинейных искажений (по ускорению).		Измеритель нелинейных искажений. ПГ не более 0,1%	да	нет

Продолжение таблицы 17.14.

1	2	3	4	5
Проверка относительного коэффициента поперечных колебаний вибростола (по ускорению).		Цифровой вольтметр, ПГ не более 0,5 %; Вибродатчик с согласующим усилителем погрешность измерения $\pm 10\%$	да	нет
Определение основной погрешности воспроизведения частоты вибрации.		Цифровой частотомер, ПГ не более 10^{-5}	да	да
Проверка нестабильности работы вибростенда		Лазерный измеритель параметров вибрации 1 разряда по МИ 2070-90 Цифровой вольтметр, ПГ не более 0,5 %	да	нет
Проверка сопротивления изоляции		Мегаомметр, класс точности 1,0	да	нет

Примечание: - допускается использовать, например, вольтметр типа В7-53, частотомер типа ЧЗ-54, мегаомметр типа М-1101; - для определения относительного коэффициента поперечных составляющих колебаний вибростола следует выбрать вибродатчик с минимальной собственной поперечной чувствительностью (не более 1-2 %).

Требования безопасности.

При проведении поверки необходимо соблюдать следующие требования безопасности:

- заземление вибростенда должно осуществляться посредством клеммы “ЗЕМЛЯ”, расположенной на задней панели вибростенда;
- недопустимо нахождение соединительных кабелей рядом с вращающимися объектами.

Необходимо руководствоваться “Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей”.

Условия поверки.

При проведении поверки должны быть соблюдены следующие условия:

- температура окружающего воздуха – $(15 \div 25) ^\circ\text{C}$;
- относительная влажность – $(40 \div 80) \%$;
- атмосферное давление – $(84 \div 106,7) \text{ кПа}$;

Вибростенд должен быть откалиброван с помощью лазерного измерителя вибрации на частоте 45,0 Гц при размахе виброперемещения 100 мкм и при среднем квадратическом значении виброскорости 10 мм / с, а затем опломбирован. Перед проведением поверки должен быть произведен внешний осмотр вибростенда с целью выявления дефектов. Проведение поверки. Проверку частот воспроизводимой вибрации, диапазонов воспроизводимых значений размаха виброперемещения, среднего квадратического значения виброскорости, максимального виброускорения воспроизводимой вибрации и определение основной относительной погрешности воспроизведения размаха виброперемещения, среднего квадратического значения виброскорости и амплитуды виброускорения производить отдельно на частотах 45; 64 и 79,6 Гц при массе нагрузки на вибростоле $\pm 1 \text{ кг}$. Рекомендуемая форма записи результатов измерений и вычислений приведена в конце настоящей методики поверки. Приведенные в таблицах значения размаха виброперемещения, среднего квадратического значения виброскорости и виброускорения ($S_{ин}$, $V_{ин}$, $a_{ин}$) устанавливать с помощью лазерного измерителя параметров вибрации, для чего закрепить на вибростолу уголкового отражатель. После установки заданных в таблицах значений произвести измерения соответствующих параметров по цифровому индикатору вибростенда ($S_{ст}$, $V_{ст}$, $a_{ст}$). Относительную погрешность воспроизведения среднего квадратического значения виброскорости ($\delta V_{отн.}$) в процентах можно определить по формуле (17.47)

$$\delta V_{отн.} = \frac{100(V_{ст} - V_{ин})}{V_{ин}}, \quad (17.47)$$

Относительную погрешность воспроизведения размаха виброперемещения ($\delta S_{отн.}$) в процентах можно определить по формуле (17.48)

$$\delta S_{отн} = \frac{100(S_{ст} - S_{ин})}{S_{ин}}, \quad (17.48)$$

Относительную погрешность воспроизведения виброускорения можно найти по формуле (17.49)

$$\delta a_{отн} = 100 \cdot \frac{(a_{ст} - a_{ин})}{a_{ин}}, \quad (17.49)$$

Результаты измерений и расчетов проверяемых параметров должны удовлетворять соответствующим требованиям ТУ 4277-031-00205435-01, приведенным в "Руководстве по эксплуатации".

Проверку коэффициента нелинейных искажений проводить при нагрузке массой 1 кг и при виброускорении 10 м/с² на частотах 45; 64 79,6 Гц после десятиминутного прогрева вибростенда.

Закрепить на вибростоле вибростенда с помощью резьбового соединения М10х1 цилиндр массой (1 ± 0,01) кг. Выход согласующего усилителя, расположенного внутри вибростенда, подключить к входу измерителя нелинейных искажений. Включить вибростенд и установить частоту вибрации 79,6 Гц. Установить амплитудное значение виброускорения 10 м/с². Измерить коэффициент нелинейных искажений. Повторить испытания по методике п.п. 3.3.3, 3.3.4 на частотах 45 и 64 Гц, для которых установить колебания соответствующие амплитудному значению ускорения 10 м/с² на этих частотах.

Значения коэффициента нелинейных искажений должны быть не более 1 %.

Проверку относительного коэффициента поперечных колебаний вибростола (по ускорению) производить на частотах 45; 64; 79,6 Гц при амплитудном значении виброускорения 10 м/с².

Закрепить на вибростоле восьмигранник, к торцу которого прикрепить вибродатчик, выход которого через согласующий усилитель подключить к цифровому вольтметру. Измерить напряжение на выходе согласующего усилителя (Uв) при колебаниях в основном направлении на частотах 45; 64; 79,6 Гц при амплитуде виброускорения 10 м/с², задаваемом по показаниям индикатора вибростенда. Последовательно закрепляя вибродатчик на боковых гранях восьмигранника, поочередно произвести измерения напряжения на выходе согласующего усилителя (Ui). При этом значение виброускорения в основном направлении контролировать перед каждым измерением и поддерживать постоянным. Вибродатчик, закрепленный на боковой плоскости, вырабатывает напряжение, пропорциональное поперечным колебаниям вибростенда и собственной основной и поперечной чувствительности.

Вычислить относительные коэффициенты поперечных колебаний в различных направлениях $K_{\text{ипп}}$ в процентах можно по формуле (17.50)

$$K_{\text{ипп}(\varphi)} = \frac{U(\varphi) + U(\varphi + 180)}{2U_{\text{в}}} \cdot 100, \quad (17.50)$$

Значения относительного коэффициента поперечных колебаний вибростола должны быть не более 2 % на частоте 45 Гц и не более 5 % - на остальных частотах. Проверку сопротивления изоляции проводят с помощью мегаомметра путём подключения его между закороченными контактами питания вибростенда и корпусом. Сопротивление изоляции должно быть не менее 20 МОм. Проверку нестабильности воспроизведенных параметров вибрации проводить по методике через 4 мин после включения вибростенда, через 30 мин. при максимальной нагрузке и отдельно на частотах 45; 64; 79,6 Гц. Значение нестабильности параметров вибрации не должны превышать 0,5 %.

Определение основной погрешности воспроизведения частоты вибрации проводить на частотах 45; 64 и 79,6 Гц с помощью электронно-счетного частотомера, подключенного к разъему “Вых. лин.” или “Вых. синхр”.

На вибростенде установить частоту вибрации 45 Гц, при которой записать в таблицу частоты колебаний по показаниям частотомера.

Вычисленные значения округляются с точностью до 0,01 Гц.

Повторить операции по методике на частотах вибрации 64 и 79,6 Гц.

Значение основной погрешности воспроизведения частоты вибрации не должно превышать $\pm 0,2$ Гц.

Оформление результатов проверки. Положительные результаты поверки должны быть оформлены свидетельством о поверке, а также записью в паспорте (формуляре) результатов и даты поверки. Допускается не оформлять свидетельство о поверке, а соответствующая запись может быть сделана в формуляре стенда и заверена подписью поверителя, оттиском его клейма и голографической маркой Госстандарта.

Вибростенд, прошедший поверку с отрицательными результатами, к эксплуатации не допускается, и на него оформляется извещение о непригодности.

Системы управления вибростендом К-5201, К-5201/П. Виброиспытательные системы по технологии виртуальных приборов. Существует обширный класс задач, связанных с использованием вибраторов (или вибростендов), где обязательно используются вибрационные измерения:

- 1) виброиспытания продукции;
- 2) прозвучивание конструкций;
- 3) поверка (калибровка) средств виброизмерений;
- 4) определение инерционно-жесткостных характеристик материалов, образцов, изделий;
- 5) виброукладка и т.д.

Реализация подобных задач с использованием технологии «виртуальных приборов» является на сегодняшний день оптимальной формой решения, которая позволяет:

- минимизировать количество используемой аппаратуры. Из дискретных приборов остаются только усилитель мощности (как правило, соответствующий усилитель всегда приобретается вместе с вибратором или уже входит в комплект поставки вибратора) и согласующие усилители для акселерометров. Функции всех остальных приборов (генерация сигналов возбуждения, обработка и анализ вибросигналов, ведение Баз Данных, формирование отчетной документации и т.д.) принимает на себя ПК с соответствующими встроенными устройствами ввода/вывода и программным обеспечением;

- автоматизировать весь процесс решения задачи, увязав единым алгоритмом процесс генерации сигналов возбуждения и анализа соответствующих им вибрационных откликов;

- избавиться от субъективизма и ошибок операторов;

- сформировать автоматизированную Базу Данных испытаний;

- обеспечить формирование и выпуск оперативной и отчетной документации по результатам испытаний;

- удобный пользовательский интерфейс, наглядное представление хода и результатов испытаний;

- увеличение количества задач, решаемых в едином взаимосвязанном алгоритме функционирования системы. Например, виброиспытания продукции. Одной из наиболее широко распространенных задач здесь является задача виброиспытаний различных приборов на тряску. При этом закрепленный на платформе вибратора прибор включен и выполняет некую отдельную тестовую программу, контролирующую его работоспособность в процессе тряски. В рамках технологии «виртуальных приборов» задача контроля работоспособности испытуемого прибора в процессе тряски также в большинстве случаев может быть увязана с общим алгоритмом функционирования системы. Такая возможность обусловлена тем, что используемые устройства ввода/выводы (платы АЦП/ЦАП) имеют не менее 8 или 16 аналоговых входов и не менее 8 разрядов цифровых входов/выходов, т.е. практически всегда существует возможность как аналоговые, так и цифровые сигналы испытуемого прибора завести на компьютер и их анализ увязать с общим алгоритмом работы;

- универсальность схемного решения. Показанный на рисунке вверху пример схемы соединений элементов системы для виброиспытаний остается неизменным практически для любых задач, связанных и использованием вибраторов, которые перечислены в начале раздела. Например, при проверке акселерометра со схемы просто исчезнет объект испытаний, а оба датчика (при этом один будет эталонным, второй поверяемым) будут установлены на платформу вибратора. Таким образом, смена решаемой задачи осуществляется просто сменой рабочей программы ПК;

- гибкость системы в адаптации к конкретным типам используемых в системе дискретных приборов;

- при всех перечисленных достоинствах любая из названных систем может быть реализована при самых минимальных затратах, не превышающих, как правило, \$4000-5000. Большинство предприятий, занимающихся реализацией перечисленных задач, уже имеют соответствующие вибраторы, усилители мощности, вибрационные каналы (о компьютерах мы даже и не говорим, где их сейчас нет, и поэтому для них создание современной, автоматизированной системы связано только с приобретением соответствующей платы АЦП/ЦАП и рабочего программного обеспечения.

Виброиспытания и контроль.

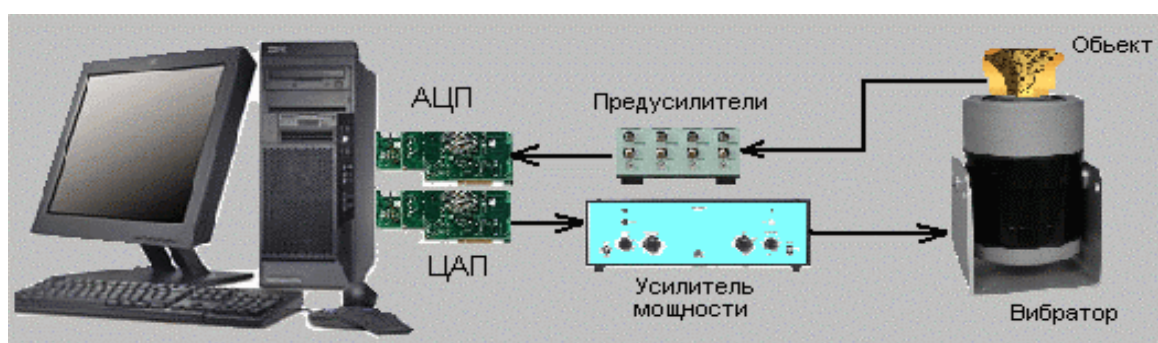


Рисунок 17.65 - Название программы: Вибротест. К-5201

Краткое описание.

Основные характеристики. Генерация синусоидального сигнала в диапазоне частот от 5 Гц до 4 000 Гц. Генерация СШВ (белый шум) в заданном оператором частотном диапазоне (от 5 Гц до 4 000 Гц). Автоматическое поддержание заданных уровней вибрации (компрессия) с заданной точностью. Задание и измерение следующих типов сигнала: виброускорение, виброскорость, вибросмещение. Задание и измерение следующих параметров сигнала: СКЗ (среднеквадратичное значение), Амплитуда, Плотность мощности (только для сигнала виброускорения в режиме генерации белого шума);- усреднение сигнала по показательному закону с выбираемой постоянной времени от 1 с до 10 с. Спектральный анализ в диапазоне 3.125 - 5 000 Гц с заданием количества спектров для усреднения;- вывод на дисплей сигналов во временной и частотной области. Сохранение данных измерений в файле с заданной периодичностью и длительностью. Четыре измерительных канала (в данной версии). Один канал генератора.

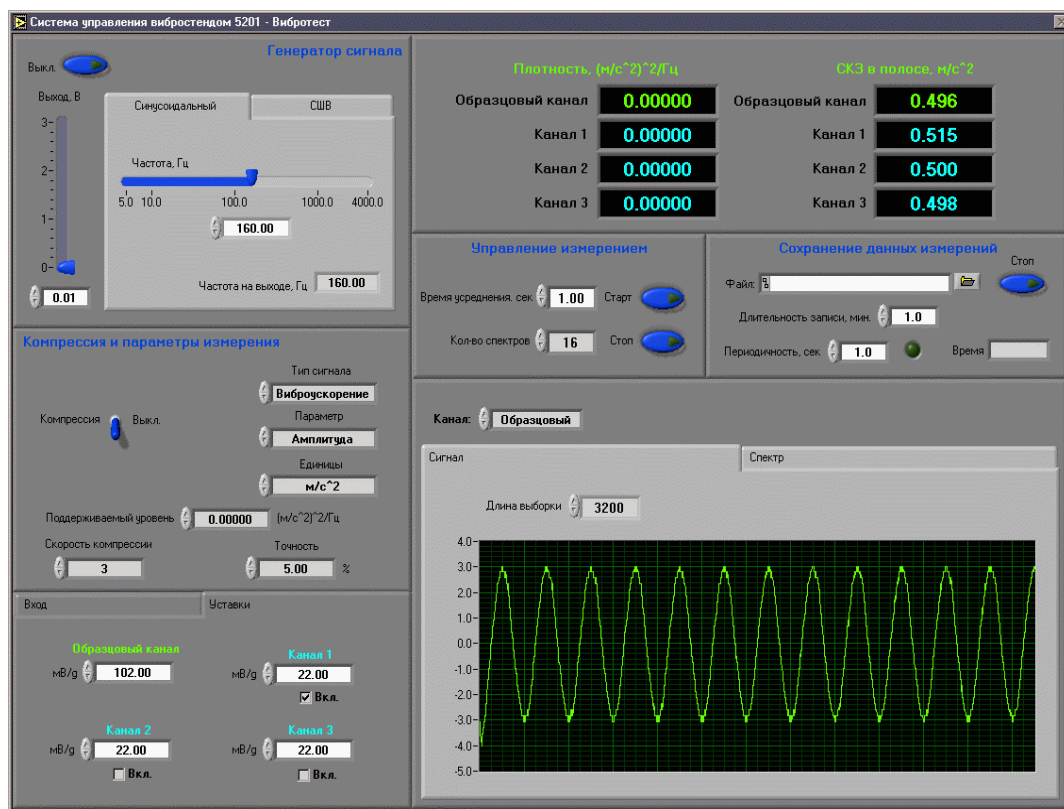


Рисунок 17.66 – Система управления вибростендом

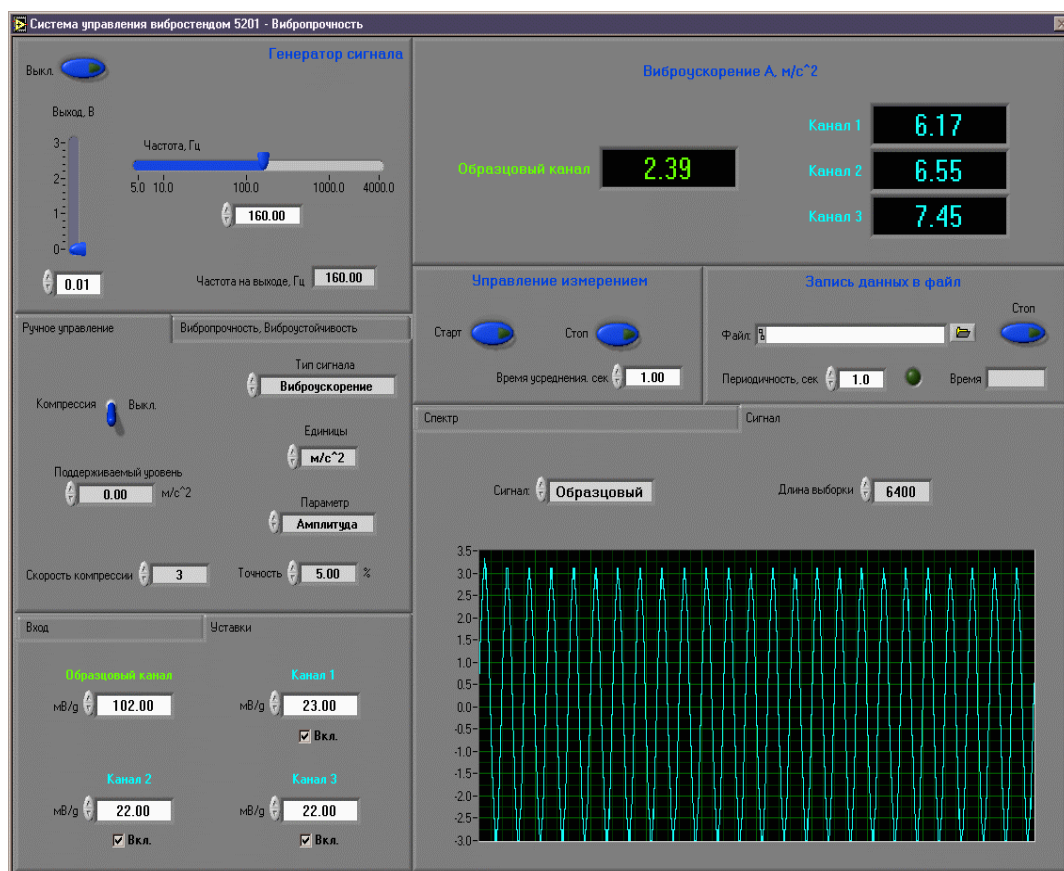


Рисунок 17.67 - Система управления вибростендом. Название программы: Вибропрочность

Краткое описание:

Прибор "Вибропрочность" предназначен для управления вибростендом и измерения заданных вибрационных параметров в автоматическом и ручном режимах по программам испытаний на виброустойчивость и вибропрочность.

Основные характеристики. Генерация синусоидального сигнала в диапазоне частот от 5 Гц до 4 000 Гц. Автоматическое поддержание заданных уровней вибрации (компрессия) с заданной точностью. Работа в автоматическом режиме по программам испытаний на вибропрочность и виброустойчивость. Создание и редактирование программ испытаний, задаются следующие параметры: частотный поддиапазон, тип сигнала вибрации (виброускорение, виброскорость, вибросмещение), измеряемый параметр вибрации (СКЗ, Амплитуда), поддерживаемый уровень вибрации, количество циклов качания. Количество поддиапазонов может быть любым, скорость изменения частоты примерно 1 октава в минуту. Задание и измерение следующих типов сигнала: виброускорение, виброскорость, вибросмещение. Задание и измерение следующих параметров сигнала: СКЗ (среднеквадратичное значение), Амплитуда. Усреднение сигнала по показательному закону с выбираемой постоянной времени от 1 с до 10 с. Спектральный анализ с заданием количества спектров для усреднения. Вывод на дисплей сигналов во временной и частотной области. Сохранение данных измерений в файле с заданной периодичностью. Четыре измерительных канала (в данной версии). Один канал генератора.

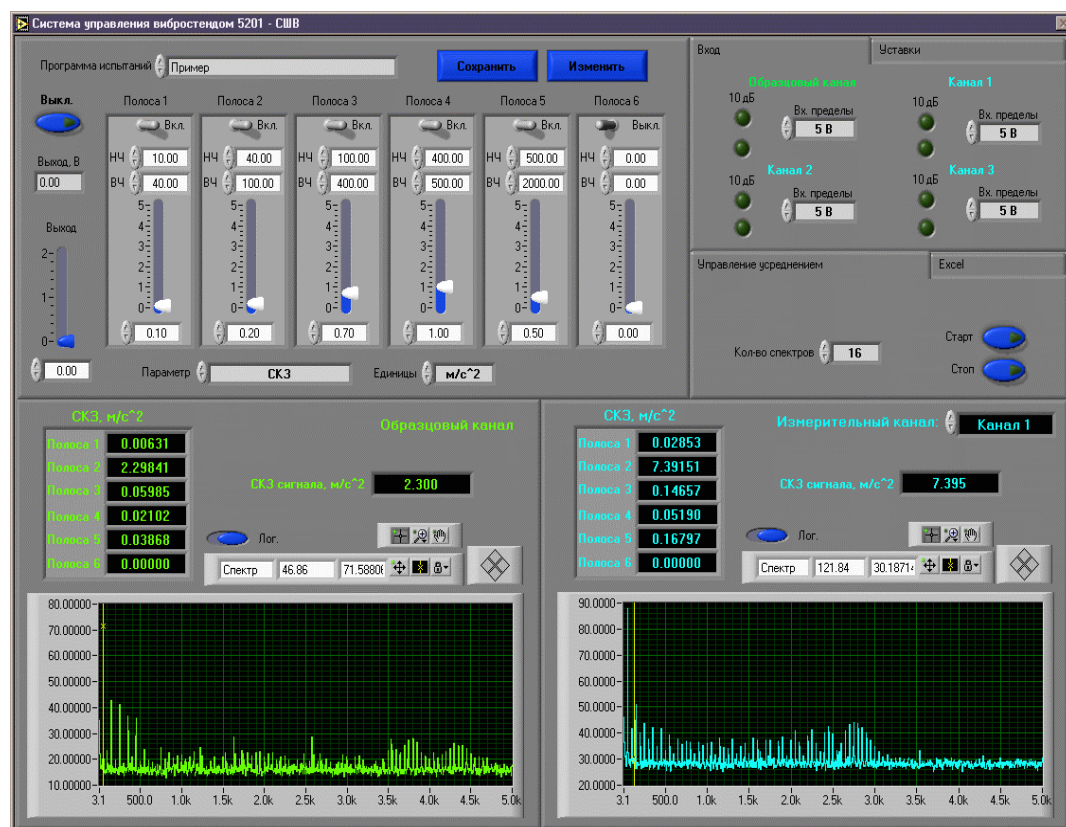


Рисунок 17.68 - Прибор «Вибротест СШВ»

Прибор «Вибротест СШВ» предназначен для управления вибростендом и измерения заданных шумовых вибрационных параметров.

Основные характеристики. Генерация СШВ (белый шум) в заданных оператором частотных диапазонах от 5 Гц до 4 000 Гц (до 6-ти поддиапазонов). Задание и измерение следующих параметров сигнала: СКЗ (среднеквадратичное значение), Плотность мощности в каждом поддиапазоне. Спектральный анализ в диапазоне 3.125 - 5 000 Гц с заданием количества спектров для усреднения. Вывод на дисплей сигналов частотной области. Сохранение настроек органов управления частотными полосами. Сохранение данных измерений в файле с заданной периодичностью и длительностью.

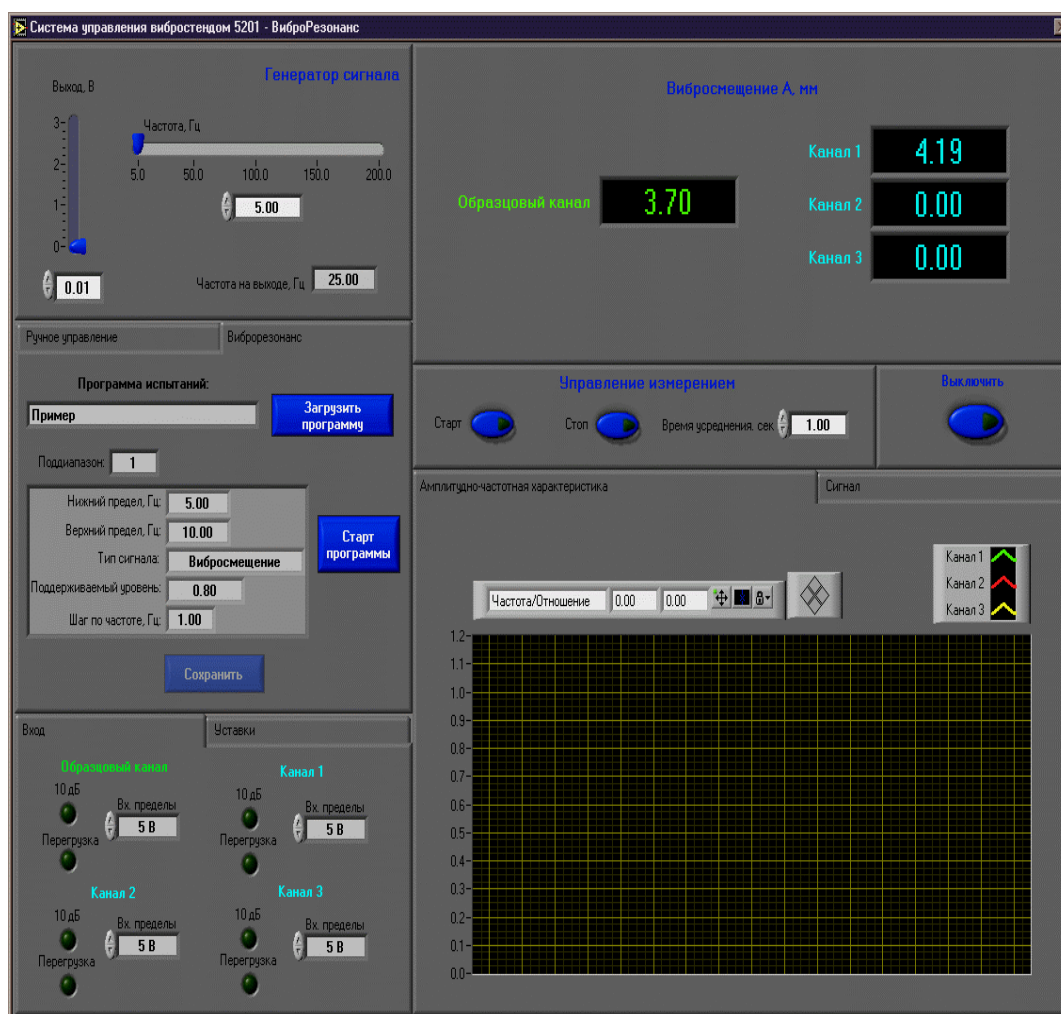


Рисунок 17.69 - Прибор "Виброрезонанс"

Прибор «Виброрезонанс» предназначен для управления вибростендом и измерения заданных вибрационных параметров в автоматическом и ручном режимах по программам испытаний определения резонансов .

Основные характеристики. Генерация синусоидального сигнала в диапазоне частот от 5 Гц до 600 Гц. Автоматическое поддержание заданных

уровней вибрации (компрессия) с заданной точностью. Работа в автоматическом режиме по программам испытаний по определению резонансов. Создание и редактирование программ испытаний, задаются следующие параметры: частотный поддиапазон, тип сигнала вибрации (виброускорение, виброскорость, вибросмещение), измеряемый параметр вибрации (СКЗ, Амплитуда), поддерживаемый уровень вибрации, шаг по частоте, количество поддиапазонов может быть любым. Задание и измерение следующих типов сигнала: виброускорение, виброскорость, вибросмещение. Задание и измерение следующих параметров сигнала: СКЗ (среднеквадратичное значение), Амплитуда. Усреднение сигнала по показательному закону с выбираемой постоянной времени от 1 с до 10 с. Вывод на дисплей сигналов во временной и амплитудно-частотной характеристики измеряемого объекта. Сохранение данных измерений в файле в формате EXCEL. Четыре измерительных канала (в данной версии). Один канал генератора.

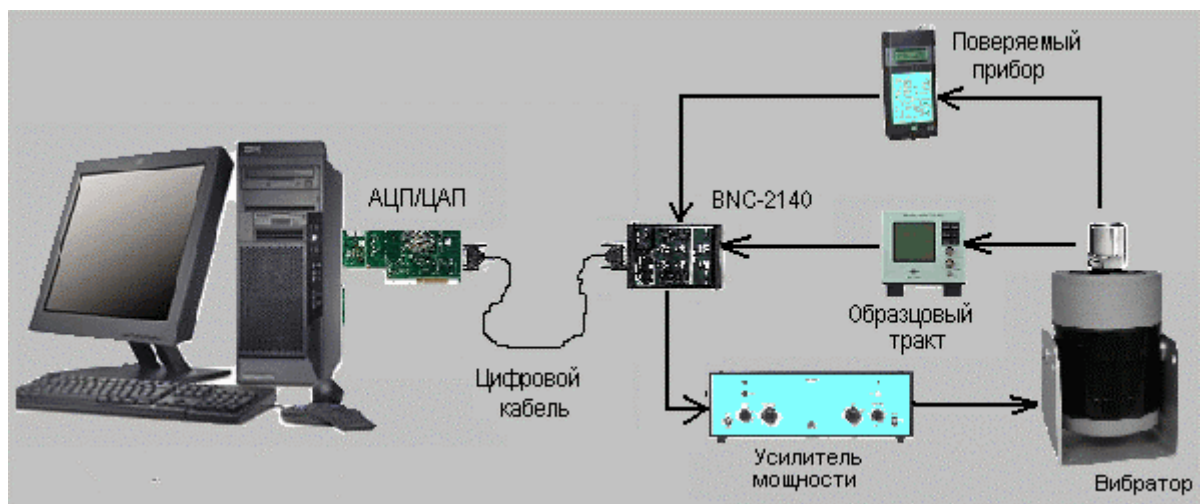


Рисунок 17.70 - К-5201/П. Виброповерка.

Одна из типовых схем поверки виброаппаратуры, имеющей сигнальный выход. Помимо этого система реализует схемы поверки:

- виброаппаратуры с показывающим индикатором, без сигнального выхода;
- по электрическому сигналу (без вибратора) любой аппаратуры;
- поверку с использованием интерферометра;
- поверку пьезодатчиков на вибраторе;
- поверку пьезодатчиков методом электрического возбуждения (без вибратора).

Терминатор BNC-2140 обеспечивает подключение пьезодатчиков линейных, дифференциальных, стандарта ICP и любых сигналов по требованию.

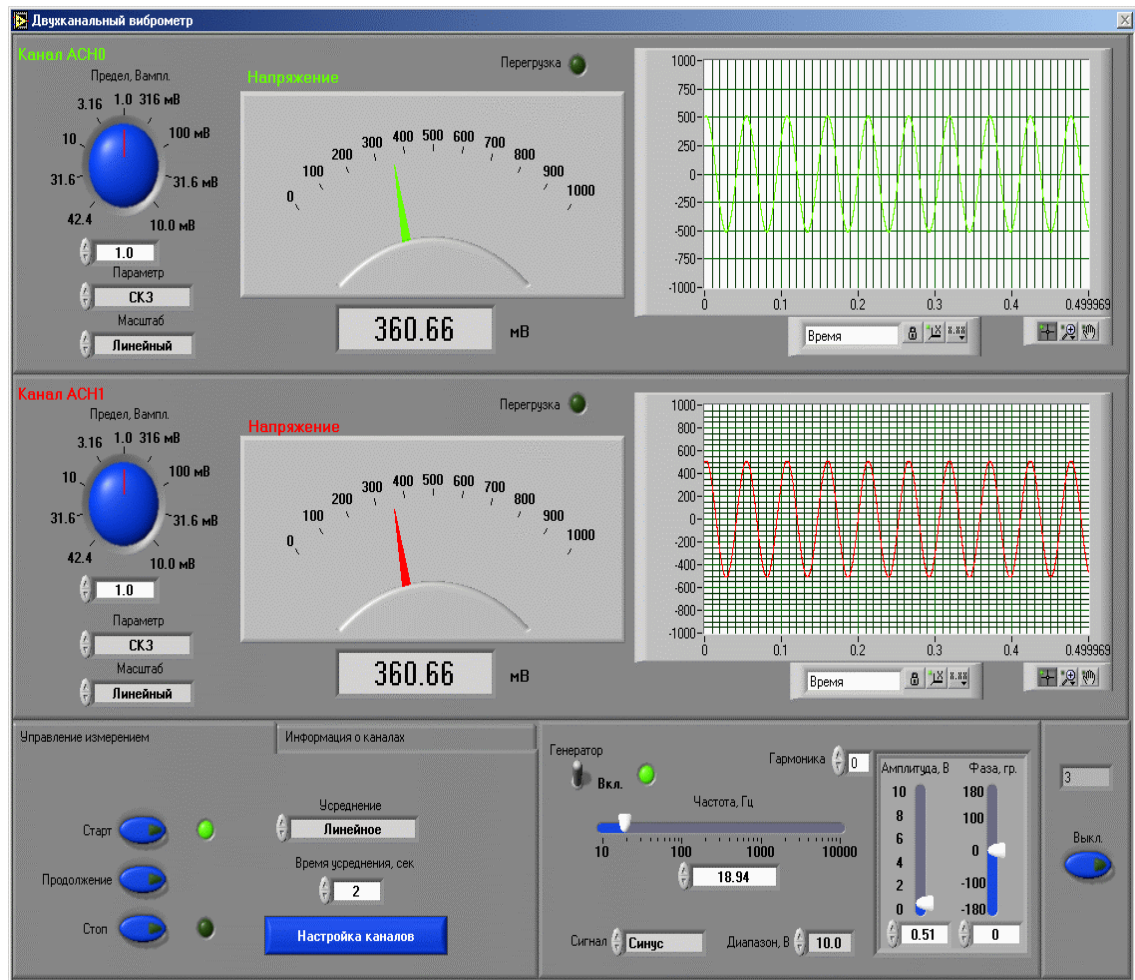


Рисунок 17.71 - Виброметр 2-х канальный универсальный

Основные характеристики. Частотный диапазон измерений: 0.3 Гц - 20 кГц (разбит на несколько поддиапазонов). Встроенный генератор синусоидального сигнала, поигармонического и шума в диапазоне частот от 0.3 Гц до 20 кГц. Задание и измерение следующих типов сигнала: виброускорение, виброскорость, вибросмещение. Задание и измерение следующих параметров сигнала: СКЗ (среднеквадратичное значение, амплитуда). Усреднение сигнала по показательному и линейному закону с выбираемой постоянной времени от 1 с до 10 с. Вывод на дисплей сигналов во временной области. Два измерительных канала (образцовый и поверяемый).

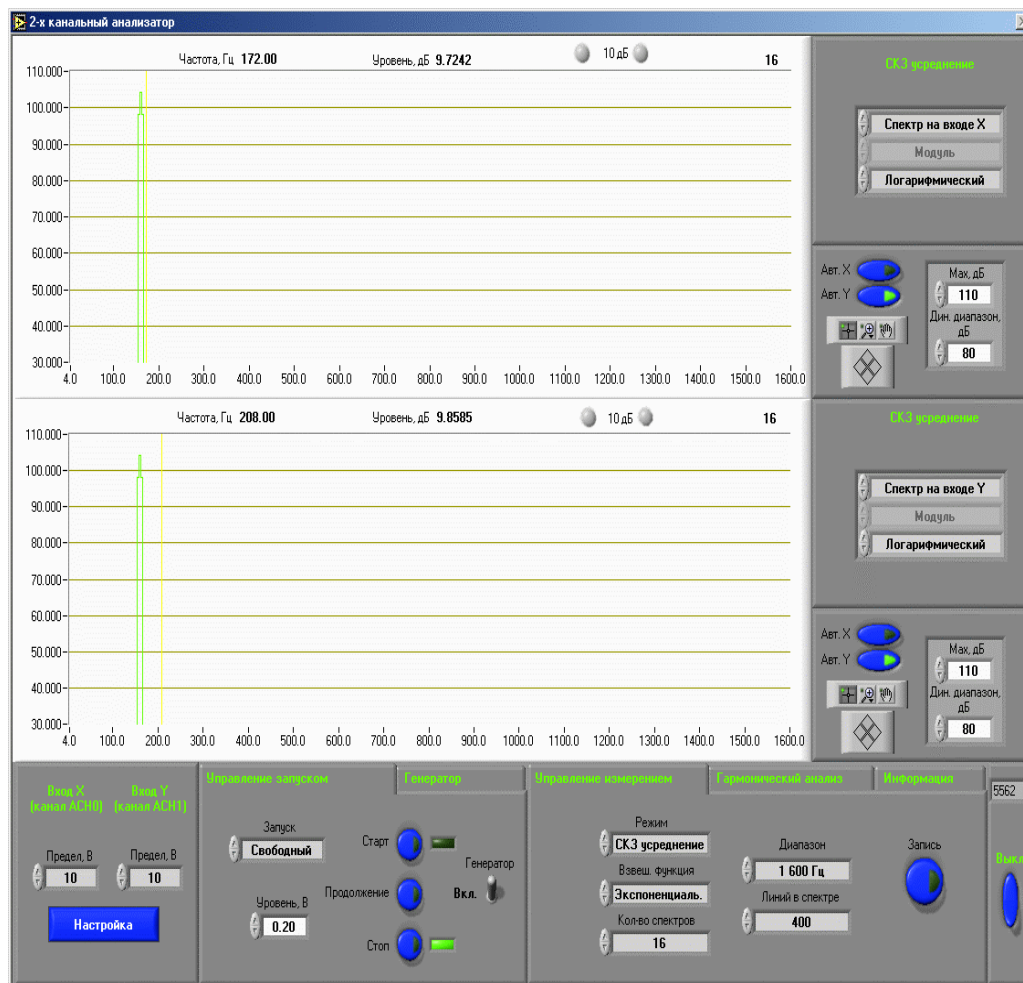


Рисунок 17.72 - 2-х канальный анализатор

Основные характеристики. Двухканальный узкополосный анализ в реальном времени (до 20 кГц) спектров сигнала.

Функции:

- мгновенные функции: комплексные спектры (модуль, фаза, реальная и мнимая часть), взаимный комплексный спектр (модуль, фаза, реальная и мнимая часть), форма волны; СКЗ усредненные функции: спектры мощности, комплексный взаимный спектр мощности (модуль, фаза, реальная и мнимая часть), комплексные частотные характеристики H1 и H2 (модуль, фаза, реальная и мнимая часть), импульсные характеристики h1 и h2, когерентность, когерентная мощность на выходе, отношение сигнал/шум, взаимная корреляция;

- векторно-усредненные функции: комплексные спектры (модуль, фаза, реальная и мнимая часть), взаимный комплексный спектр (модуль, фаза, реальная и мнимая часть), форма волны хранение максимума: спектры мощности.

Генератор встроенный. Частотные диапазоны: 0-100 Гц, 0-200 Гц, 0-400 Гц, 0-800 Гц, 0-1.6 кГц, 0-3.2 кГц, 0-6.4 кГц, 0-12.8 кГц. Количество линий в спектре: 200, 400, 800, 1600 (может быть любым).

Усреднение: мгновенные спектры, СКЗ усреднение, векторное (синхронное), хранение максимума.

- взвешивающая функция: линейная, экспоненциальная.
- Окна коррекции: Hamming, Hanning и т.д. (всего 9).
- Триггер: свободный запуск, внешний (аналоговый, цифровой).
- Вывод информации: на принтер, в файл, в формате EXCEL.

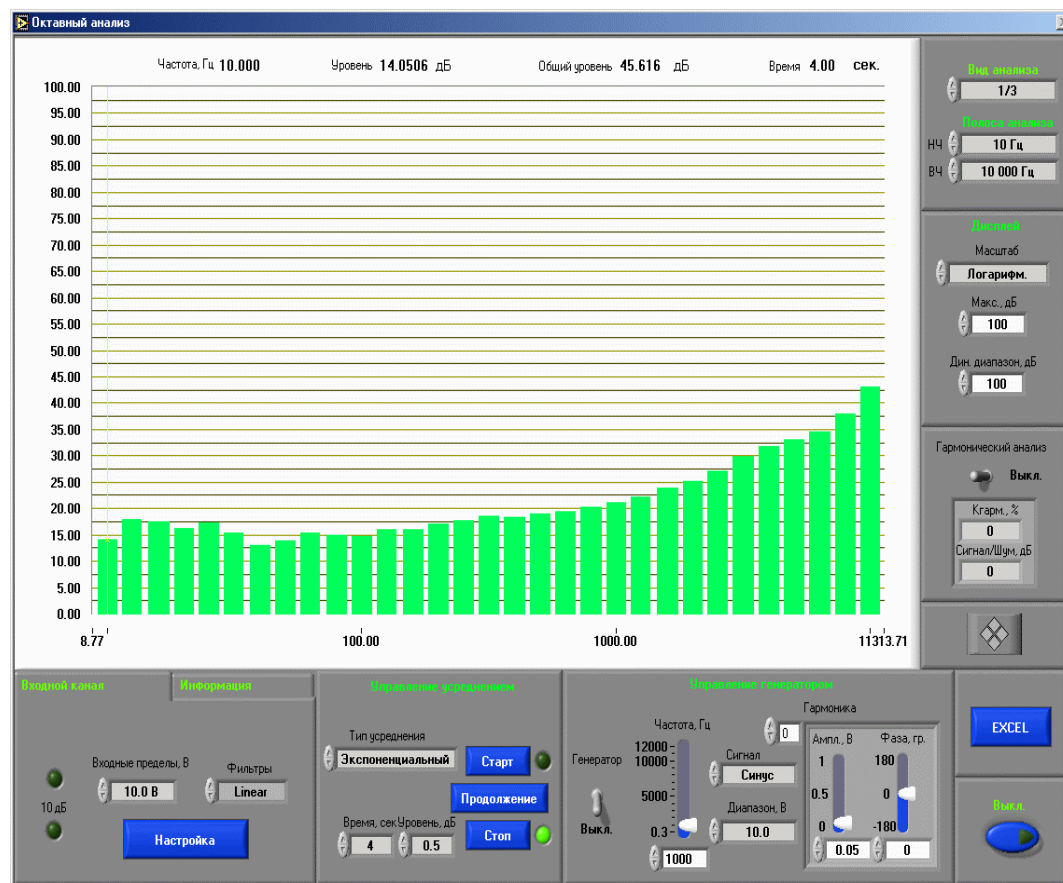


Рисунок 17.73 - Процентный анализатор

Предназначен для частотного анализа стационарных и импульсных процессов в реальном времени. Особенности: Частотный анализ в реальном времени. Ширина октав: 1/1, 1/3, 1/6, 1/12, 1/24; Частотный диапазон: 0.5 Гц - 20 кГц. Характеристики фильтров удовлетворяют требованиям IEC 1260:1995. Измерение общего уровня в каждом частотном диапазоне анализа; Отображение спектров в логарифмическом и линейном масштабе; Интегрирование сигнала: виброускорение, виброскорость; Взвешивающие фильтры: линейный, А, В, С.

Усреднение по линейному и показательному закону с выбираемой постоянной времени от 1/8 сек. до 128 сек.; экспоненциальное усреднение с регулируемой статистической точностью; хранение максимальных значений.

Генератор сигналов различной формы.

Вывод информации: в файл, в формате EXCEL.

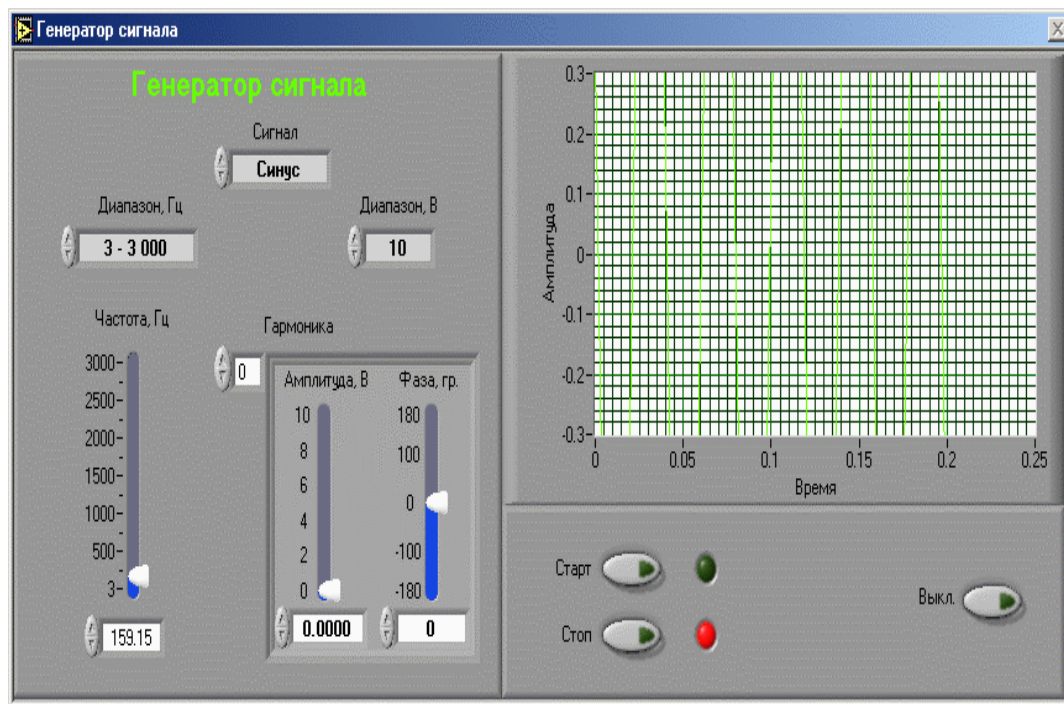


Рисунок 17.74 - Генератор

Генерация сигналов различной формы в диапазоне частот от 0.3 Гц до 20 кГц.

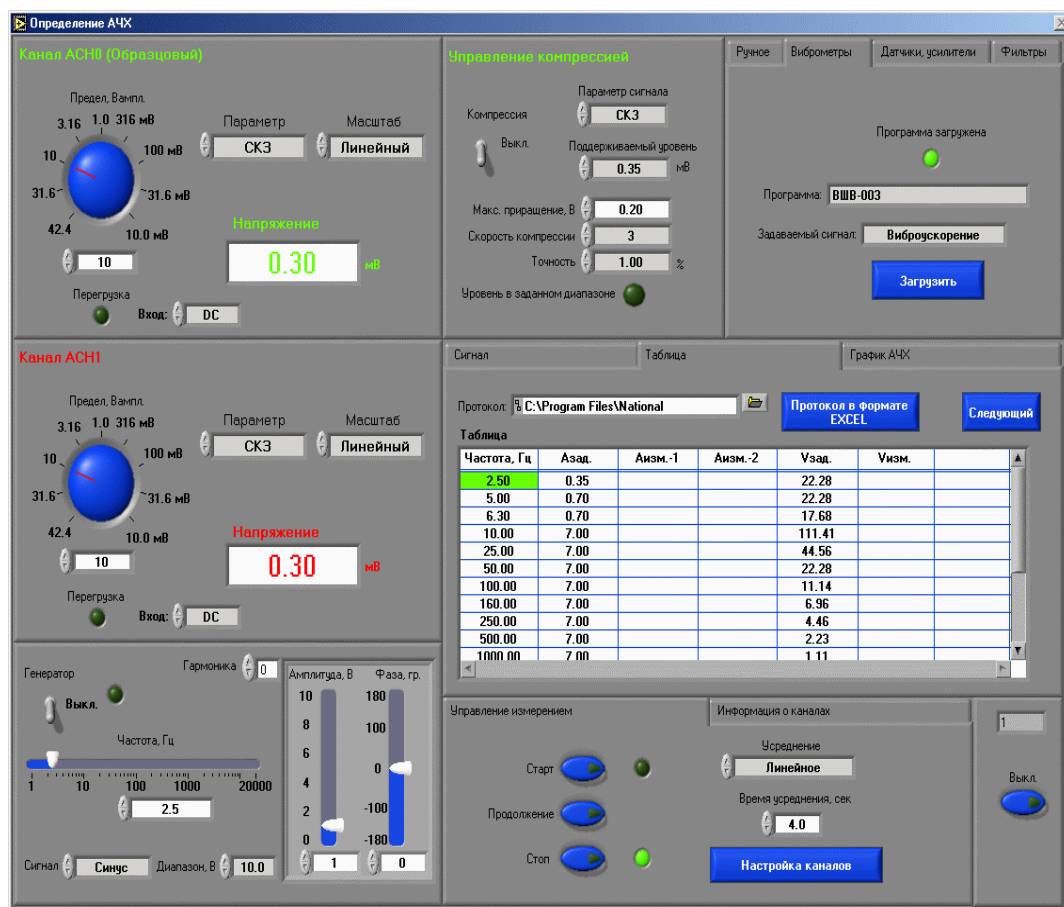


Рисунок 17.75 - Определитель АЧХ

Предназначен для определения амплитудно-частотных характеристик различных приборов и датчиков. Особенности. Встроенный генератор сигналов различной формы в диапазоне от 0.3 Гц до 20 кГц. Частотный диапазон: 0.3 Гц - 20 кГц. Интегрирование сигнала: виброускорение, виброскорость, вибросмещение; Усреднение по линейному и показательному закону с выбираемой постоянной времени. Компрессия: управление и поддержание заданных уровней вибрации вибростенда. Протокол. Формирование протоколов в формате EXCEL.

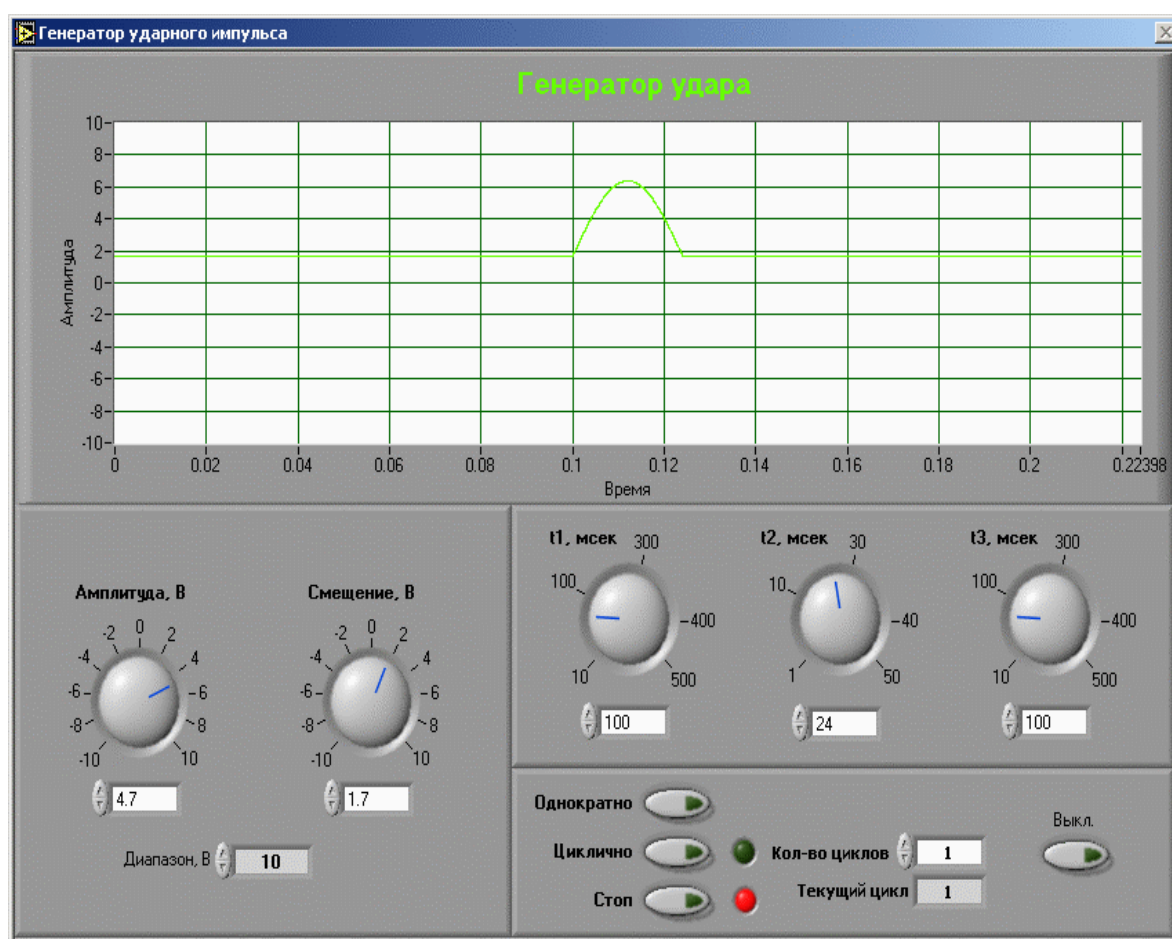


Рисунок 17.76 - Генератор ударных импульсов

Генерация сигналов ударных импульсов различной длительности

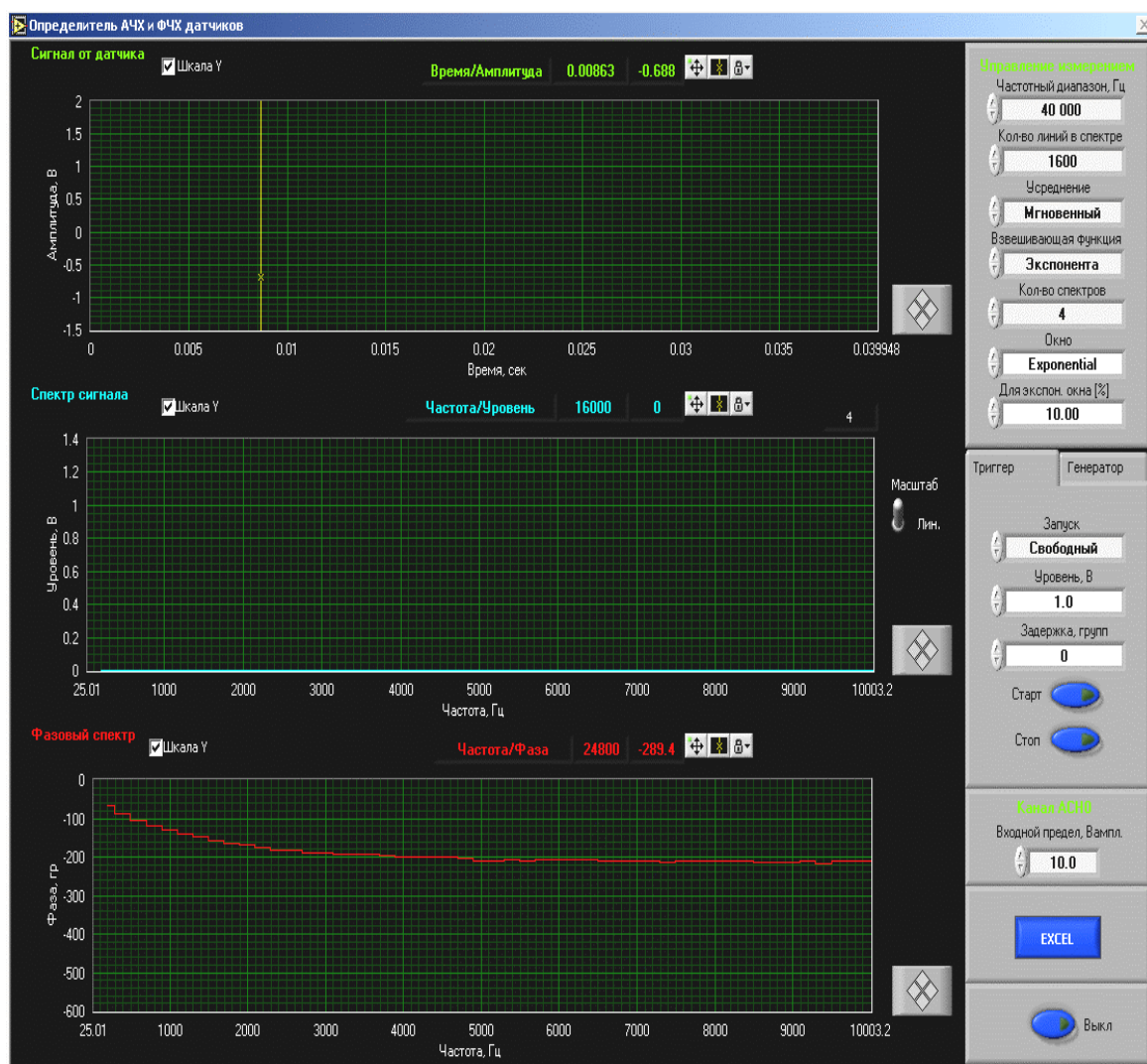


Рисунок 17.77 - Прибор «Вибротест СШВ» Прибор поверки пьезодатчиков методом электрического возбуждения

Частотный диапазон: 0 Гц - 80 кГц.

Усреднение по линейному и показательному закону.

Триггер: свободный запуск, внешний.

Вывод информации: в формате EXCEL.

Список использованных источников

- 1 Об обеспечении единства измерений : Закон Российской Федерации - М.: Российская газета. – 1993 – 9 июня; (Государственные стандарты. – 1993 - №11-12. – С 56-70.)
- 2 РМГ 29 – 99 ГСИ. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Метрология. Основные термины и определения - М.: Издательство стандартов, 2000 – 46 с.
- 3 Харт Х. Введение в измерительную технику: Пер. с нем. – М.: Изд – во “Мир”, 1999. –391 с.
- 4 ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ. Методики выполнения измерений - М.: Издательство стандартов, 1996 – 19 с.
- 5 Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога: Справочник. - М.: Издательство стандартов, 1991 – 79 с.
- 6 Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие (для работников метрологических служб): В 2 - х кн. - М.: Изд-во стандартов, 1990 – 582 с.
- 7 Шишкин И.Ф. Основы метрологии, стандартизации и контроля качества: Учебное пособие, - М.: Изд-во стандартов, 1987 – 320 с.
- 8 Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. для студ. вузов по спец. Автоматизация технологических процессов и производств. - М.: Высш. шк., 1989. – 456 с.
- 9 Боднер В.А., Алферов А.В. Измерительные приборы / Учеб. для вузов в 2-х т. - М.: Изд-во стандартов, 1986 – т.1 – 392 с., т.2 – 224 с.
- 10 Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Л.: Энергоатомиздат, 1987 – 131 с.
- 11 Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника М.: Высшая школа, 1991 – 384 с.
- 12 Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учебное пособие для вузов. – М.: Логос, 2000. – 408 с.
- 13 Лифиц И.М. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебное пособие. – М.: ООО Юрайт, 2000. – 285 с.
- 14 Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
- 15 ГОСТ 16263-70 ГСИ. Метрология. Термины и определения - М.: Издательство стандартов, 1991 – 54 с. (с 01 января 2001 года данный стандарт отменен, взамен ему действует стандарт РМГ 29 – 99).
- 16 Берков В.И. Технические измерения (альбом): Учебное пособие для средн. проф.-техн. училищ. М.: Высшая школа, 1977. – 232 с.
- 17 Жарковский Б.И. Приборы автоматического контроля и регулирования (устройство и ремонт) : Учебник для сред. Проф.-техн. училищ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1983. – 312 с.
- 18 Городецкий Ю. Г. Конструкции, расчет и эксплуатация средств измерения в машиностроении, М.: Машиностроение. 1971.
- 19 Журавлев А- Н. Допуски и технические измерения. М.: Высшая школа, 1969.

20 Зимин А. П., Игнатов А. В. Контролер-машиностроитель. М.: Машиностроение, 1965.

21 Иванов А. Г. и др. Измерительные приборы в машиностроении М.: Машиностроение. 1964.

22 Крупицкий Э. И. Пособие по допускам и техническим измерениям. Минск: Высшая школа. 1973.

23 Левенсон Е. М. Основы метрологии и технические измерения М: Машгиз, 1958.

24 Марков Н. Н. и др. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. М.: Машиностроение, 1967.

25 Справочник контролера машиностроительного завода./Под редакцией А. И. Якушева. М.: Машиностроение, 1970.

26 Справочник по производственному контролю в машиностроении./Под редакцией А. К. Кутая. М.: Машиностроение. 1974.

27 Якушев А. И. Основы взаимозаменяемости и технические измерения. М.: Машиностроение. 1974.

28 Ганевский Г. М., Константинов В. М. Средства измерения и контроля в машиностроении: Учебные плакаты. М.: Высшая школа, 1972

29 Петров И.К. Технологические измерения и приборы в пищевой промышленности.–2-е изд. перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 344 с.

30 ГОСТ 15.001-88 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения.- М.: Издательство стандартов, 1989 – 7 с.

31 Гаузнер С.И., Кивилис С. С., Осокина А. П., Павловский А. Н. Измерение массы, объёма и плотности. М.: Издательство стандартов, 1972 - 664с.

32 Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Основы метрологии: Учебное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 280 с.

Приложение А (справочное) Вспомогательные термины и понятия

Контроль - установление соотношения между состоянием (свойством) объекта контроля и заданной нормой, определяющей качественно различные области его состояния. (Если для контроля используются автоматические измерительные устройства, то его называют автоматическим контролем.)

Автоматическое регулирование - поддержание постоянной некоторой заданной величины, характеризующей процесс, или изменение его по заданному закону, осуществляемое с помощью измерения состояния объекта или действующих на него возмущений и воздействия на регулирующий орган объекта.

Автоматическое управление - автоматическое осуществление совокупности воздействий, выбранных из множества возможных на основании определенной информации и направленных на поддержание или улучшение функционирования управляемого объекта в соответствии с целью управления.

Оптимизация - в общем случае целенаправленная деятельность, заключающаяся в получении наилучших результатов при соответствующих условиях.

Математическая модель объекта управления - уравнение (или система уравнений), связывающее все входные и выходные параметры объекта и управляющие воздействия.

Критерий управления (оптимальности) - соотношение, характеризующее качество работы объекта управления в целом и принимающее различные значения в зависимости от используемых воздействий (например, максимальный выход продукта при заданном расходе сырья, максимальный доход, минимальная себестоимость продукции при заданном качестве и т.д.).

Ограничения - значения входных и выходных параметров, ограниченных технологическими возможностями аппаратов и техническими условиями, определяющими количественные соотношения выпускаемых продуктов, и их качества.

Алгоритм управления - совокупность предписаний, определяющих характер воздействий извне на объект управления с целью правильного выполнения технологического процесса в этом объекте. (Алгоритм управления разрабатывается в результате исследовательской работы на основе модели объекта управления, критерия оптимизации и ограничений, представляется некоторой системой уравнений и реализуется в процессе управления с помощью ЭВМ.)

Однозначная мера - мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (например, гиря, конденсатор постоянной емкости и др.).

Стандартный образец - мера для воспроизведения величин, характеризующих свойства или состав вещества, и материалов (например, образцы свойств нефти и нефтепродуктов и т.д.).

Образцовое вещество - образцовая мера в виде вещества с известными свойствами, воспроизводимыми при совпадении условий приготовления, указанных в утвержденной спецификации (например, «чистая» вода, «чистые» газы и т.д.).

Многозначная мера - мера, воспроизводящая ряд одноименных величин различного размера (например, миллиметровая линейка, конденсатор переменной емкости и т.д.).

Аналоговый измерительный прибор - измерительный прибор, автоматически вырабатывающий непрерывные аналоговые сигналы измерительной информации, показания которого представлены в форме графика или диаграммы.

Цифровой измерительный прибор - измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

Показывающий измерительный прибор - измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний. Показывающий прибор может быть аналоговым или цифровым.

Регистрирующий измерительный прибор - измерительный прибор, в котором предусмотрена регистрация показаний.

Самопишущий измерительный прибор - регистрирующий измерительный прибор, в котором предусмотрена запись показаний в форме диаграммы. Самопишущие приборы обычно бывают аналоговыми.

Печатающий измерительный прибор - регистрирующий измерительный прибор, в котором предусмотрено печатание показаний в цифровой форме. Печатающие приборы обычно бывают цифровыми.

Суммирующий измерительный прибор - измерительный прибор, показания которого функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых к нему по различным каналам.

Интегрирующий измерительный прибор - измерительный прибор, в котором подводимая величина подвергается интегрированию по времени или по другой независимой переменной.

Первичный измерительный преобразователь (или датчик) измерительный преобразователь, к которому подведена измеряемая величина.

Промежуточный измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, занимающий в измерительной цепи место после первого.

Передающий измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации.

Масштабный измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, предназначенный для изменения величины в заданное число раз (по существу это усилитель сигнала измерительной информации).

Функциональный измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, предназначенный для формирования сигнала измерительной информации.

Приложение Б (справочное)

Соотношение единиц давления, допущенных к применению с обязательным переводом в международную систему единиц (СИ)

$1 \text{ ат (атмосфера техническая)} = 1 \text{ кг/см}^2 \text{ (кгс/см}^2\text{)} = 10 \text{ мм вод.ст.} = 0,981$
 $\text{бар} = 735,56 \text{ мм рт. ст.} = 98066,5 (\approx 100\ 000) \text{ Н/м}^2 = 100 \text{ кН/м}^2 = 0,1 \text{ МН/м}^2$;
 $1 \text{ бар} = 1,02 \text{ ат}$;
 $1 \text{ Па} = \text{Н/м}^2 =$; $1 \text{ атм (атмосфера физическая)} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1$
 $01325 \text{ Н/м}^2 = 1,033 \text{ кг/см}^2 = 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа} = 100 \text{ кПа}$

Таблица Б1- Соотношение единиц давления

Единицы	Па	кг·с/м ²	ат(кгс/см ²)	мм вод.ст.	мм рт. ст.
1 Па	1	0,10197	$0,10197 \cdot 10^{-4}$	0,10197	$7,5006 \cdot 10^{-3}$
1 кг·с/м ²	9,80665	1	10^{-4}	1	$73,56 \cdot 10^{-3}$
1 кг·с/см ²	9,80665	10^4	1	10^4	735,56
1 мм вод. ст.	9,80665	1	10^{-4}	1	$73,56 \cdot 10^{-4}$
1 мм рт. ст.	133,322	13,595	$13,595 \cdot 10^{-4}$	13,595	1

Приложение В (справочное)

Таблица В1 – Характеристики термопар

Химический состав термоэлектродов. Положительный, отрицательный	Диапазон измеряемых температур при длительном измерении, °С	Предельная температура при кратковременном применении, °С	Допустимые отклонения (погрешность невоспроизводимости), °С
Хромель Копель (89%Ni, 9,8%Cr, (55%Cu, 1% Fe, 0,2 % Мп) 45% №)	-50 + 600	800	±(2,2 - 5,8)
Алюмель То же (94%Ni, 2% Al, 2,5% Mn, 1%Si, 0,5% Fe)	-50 + 1000	1300	±(4,0-9,7)
Платинородий Платина (100%Pt) (90%Pt, 10%Rh)	0 + 1300	1600	±(1,2-3,6)
Платинородий Платинородий (70% Pt, 30% Rh) (94% Pt, 6% Rh)	300 ÷ 600	1800	±(3,2 - 5,2)
Сплав вольфрама с рением (95% W, 5% Re) (80% W, 20% Re)	0 4÷2200	2500	±(5,4 - 9,7)

Таблица В2 –Характеристика термоэлектрических преобразователей

Термоэлектрический преобразователь	Градуировка	ТермоЭДС при $t=100^{\circ}\text{C}$, $t_0=0^{\circ}\text{C}$, мВ
Хромель - копель (ТХК)	ХК68	$6,90 \pm 0,30$
Хромель - алюмель (ТХА)	ХАв8	$4,10 \pm 0,15$
Платинородий-платина (ТПП)	ПП68	$0,64 \pm 0,03$
Платинородий –платинородий (ТПР)	ПР30/668	0,431 (при $t=300^{\circ}\text{C}$)
Вольфрамрений –вольфрамрений (ТВР)	ВР5/2068	1,33

Приложение Г (справочное)

Примерная программа дисциплины «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» для специальности 072000 «Стандартизация и сертификация»

1 Лекционные занятия (пятый семестр) - 17 часов.

1.1 Тема 1 Введение в «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» - 2 часа.

1.1 Предмет, задачи и содержание дисциплины. Многообразие измерительных задач. Основные этапы развития методов и средств измерений, испытаний и контроля. Структура курса, его место и роль в подготовке инженера по сертификации продукции, связь с другими дисциплинами.

2 Тема 2 Классификация измерений - 6 часов.

2.1 Классификация измерений по областям измерений (механика, теплота, электричество и магнетизм, оптика, акустика, атомная и ядерная физика), по подразделам каждой области (группы измерений), характеристикам измеряемых величин или параметров (вид измерений и диапазон значений измеряемой величины). Основные характеристики процесса измерений (условия измерений – характер зависимости от времени, зависимость от влияющих величин, агрегатное состояние), областям применения (специфика измерительных задач). Модели измеряемых свойств объектов и явлений: скаляр, вектор, тензор, детерминированный и случайный процессы физических явлений, из которых необходимо выбрать наиболее значимые величины для их количественного определения и измерения, физические величины и связанные с ними понятия. - 4 часа.

2.2 Средства измерительной техники, их виды и основные характеристики: - средство измерений (СИ); - мера физической величины; - измерительный прибор; - измерительный преобразователь; - средства поверки СИ; - средства калибровки; - погрешности методов измерений и их разновидности в общих формулировках. - 2 часа.

3 Тема 3 Методы измерений - 6 часов.

3.1 Методы измерений непосредственного сравнения с мерой и опосредованного сравнения с мерой. Разновидности методов измерения непосредственного сравнения с мерой (дифференциальный метод, нулевой, замещения, совпадения, противопоставления и т.д.). Обобщенные структурные схемы методов измерения при прямом преобразовании и при наличии компенсации. Условия применения методов. Оценка возможности методов. Метод опосредованного сравнения с мерой. Обобщенная структурная схема метода. Разновидности метода - с использованием меры и без нее. Условия применения методов. Оценка возможности методов.

4 Тема 4 Подготовка к измерениям - 3 часа.

4.1 Анализ постановки измерительной задачи (измеряемые свойства, точность результата измерения, форма его представления). Выбор модели объекта или явления. Создание условий для измерений и контроль их выполнения. Выбор средств измерений и метода измерения. Выбор числа измерений (наблюдения при измерении и результат измерения). Подготовка оператора. Опробование средств измерений. Методики выполнения измерений.

5 Лекционные занятия (шестой семестр) - 34 часа.

5 Тема 5 Погрешности методов и средств измерений - 14 час.

5.1 Погрешности измерений. Виды погрешностей. Абсолютная погрешность. Относительная погрешность. Систематическая погрешность. Грубая погрешность (промах). Случайная погрешность. Основная погрешность. НСП - не исключенный остаток систематической погрешности. СКО - среднее квадратическое отклонение результатов наблюдений при измерениях - 4 час.

5.2 Учет систематических погрешностей и способы их уменьшения. То же самое при различных методах измерений (метод замещения, метод противопоставления, метод компенсации погрешности по знаку, метод рандомизации, метод симметричных наблюдений и т.д.) - 6 час.

5.3 Обработка результатов измерений и оценивание погрешностей измерений. Измерения с однократными наблюдениями. Измерения с многократными измерениями. Косвенные измерения. Косвенные измерения при линейной зависимости. Косвенные измерения при нелинейной зависимости. Метод приведения. Формы представления и интерпретации результатов измерений. Правила округления и записи результатов наблюдений и измерений - 4 час.

6 Тема 6 Средства измерений - 4 часа.

6.1 Классификация средств измерений по определяющим признакам. Обобщенная структурная схема средств измерений. Элементы структурной схемы: меры, компараторы, первичные и вторичные преобразователи, устройства обработки, представления и регистрации информации, каналы связи, вспомогательные элементы. Технические характеристики элементов измерений и их метрологическая, информационная, конструктивная и эксплуатационная совместимость. Метрологические характеристики средств измерений. Комплекс нормируемых метрологических характеристик средств измерения присущих для конкретного типа. Государственная система промышленных приборов и средств измерений.

7 Тема 7 Применение вычислительной техники в средствах измерений 2 часа.

7.1 Ввод аналоговой измерительной информации в устройства цифровой вычислительной техники. Приборный интерфейс. Применение

средств цифровой вычислительной техники в измерительных приборах, установках и системах.

8 Тема 8 Применение средств измерений - 10 час.

8.1 Измерение механических величин. Группы измерений и измеряемые величины: - пространственно-временные величины (длина, угол, время, объем); - кинематические величины (линейная и угловая скорости, линейное и угловое ускорение, частота механических колебаний и вращения); - динамические величины (масса, сила, массовый и объемный расходы, момент силы и инерции, количество движения, давления, работа, мощность, энергия, спектральная плотность, амплитуда механических колебаний, механические деформации); - механические свойства веществ и материалов (плотность, удельный вес, динамическая и кинематическая вязкость, модуль сдвига и упругости, твердость, прочность, предел упругости, текучести, коэффициент поверхностного натяжения); - механика и форма поверхности (толщина пленок и покрытий, параметры топографии поверхности, параметры отклонений формы и расположения поверхностей). Метрологическое обеспечение и обобщенный комплекс требований к измерениям механических величин (технический, организационный, нормативные аспекты) - 2 час.

8.2 Измерения тепловых величин. Группы измерений и измеряемые величины:

- термометрия (температура, температурный градиент, перенос тепловой энергии, количество теплоты, термодинамический потенциал, уд. теплота, фазовое превращение и химическая реакция с тепловым выделением, тепловой поток, коэффициент теплопроводности, теплопередачи, теплоотдачи и т. д.);

- физико-химическая (концентрация, молярность, скорость химической реакции, показатель кислотности - pH, и т.д.). Метрологическое обеспечение и обобщенный комплекс требований к измерениям тепловых величин (технический, организационный, нормативные аспекты) - 2 час.

8.3 Измерения электрических и магнитных величин. Группы измерений и измеряемые величины:

- электрические величины (количество электричества, поверхностная плотность зарядов, разность потенциалов, сила тока);

- электромагнитные поля (напряженность электрического поля, магнитная индукция, магнитный поток, магнитодвижущая сила);

- электрические цепи (напряжение, э.д.с., сила тока, разность потенциалов напряжений, емкость, сопротивление, индуктивность);

- другие параметры электрических цепей (сдвиг фаз, энергия, мощность, проводимость, частота электрических колебаний, характеристики форм электрических сигналов и колебаний);

- распространение электрических волн (волновое сопротивление, коэффициент стоячей и бегущей волны, фазовые характеристики волнового электрического поля и т.д.);

- устройство основного измерительного органа электроизмерительного прибора и методы расчетов их параметров для измерения различного назначения величин через косвенное преобразование их в электрическую природу.

Метрологическое обеспечение и обобщенный комплекс требований к измерениям электрических величин (технический, организационный, нормативный аспекты) 4 часа.

8.4 Измерения оптических величин - краткий обзор; Измерения акустических величин - краткий обзор; Измерения атомной и ядерной физики - краткий обзор; Заключение (краткое обобщение основных вопросов курса лекций, перечисление наиболее удачной учебной нормативно-технической литературы.) Актуальные проблемы и перспективы развития методов и средств измерений -2 часа.

9 Тема 9 Методы и средства испытаний и контроля - 4 часа.

9.1 Понятие испытаний и его отличие от измерений. Метрологическая экспертиза предметов испытаний. Испытание продукции. Испытание оборудования. Перечисление НТД и стандартов для обеспечения испытаний на различных стадиях создания продукции и предметов потребления 2 часа.

9.2 Понятие контроля продукции и качества товаров. Метрологическая экспертиза методик контроля и технологических процессов в производстве, входного контроля поступающего сырья и материалов для производственных процессов на предприятиях. Перечисление НТД и стандартов как пример для обеспечения деятельности ОТК и сертификационных подразделений предприятий, сертификационных испытательных центров, сертификационных органов Российской Федерации -2 часа.

Приложение Д
(рекомендательное)
Перечень средств измерений применяемых в производстве
пищевых продуктов

1 Сахариметр универсальный типа СУ-4

Сахариметр СУ-4 предназначен для определения концентрации сахарозы в растворах по углу вращения плоскости поляризации. Предназначен для измерения при длине $\lambda = 589,3$ нм в принятых сахарных градусах, °S.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон измерений в международных

сахарных градусах, °S

от – 40 до + 120

Цена деления отсчетного устройства °S, не более

0,05

Пределы допускаемой основной погрешности, °S

± 0,05

Порог чувствительности не более

0,05

Габаритные размеры, мм

870 x 200 x 400

Масса, кг

0,5

Работает при температуре окружающей

среды, °C

от + 10 до + 35

относительной влажности воздуха, %

не более 80

Поверка прибора производится по ГОСТ 8.258 – 77

2 Прибор «КВАРЦ 21» для определения влажности

Прибор предназначен для определения влажности пищевых продуктов и сырья, позволяет выполнять высушивание пищевого сырья и продуктов при заданной температуре в течение требуемого времени. По результатам взвешивания пищевого сырья до и после высушивания производят расчет влажности.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон устанавливаемых температур, °C

от + 100 до + 160

Дискретность устанавливаемых температур, °C

1,0

Основная погрешность, °C

± 2

Время нагрева, мин

не более 30

Диапазон устанавливаемых значений времени

высушивания, мин

от 1 до 9

Погрешность выдержки установленного времени, с

15

3 Рефрактометр универсальный лабораторный УРЛ – 1

Рефрактометр предназначен для непосредственного измерения показателя преломления жидких и твердых веществ их средней дисперсии и для определения концентрации растворов. В основу работы положен метод определения показателя преломления исследуемого вещества по предельному углу преломления или полного внутреннего отражения.

Метрологические и технические характеристики

Пределы измерений по шкале показателя

преломления, n_D

от 1,2 до 1,7

По шкале сухих веществ по сахарозе, %

от 0 до 95

Пределы допускаемой погрешности измерений:

- по шкале показателей преломления, n_D

$\pm 1 \cdot 10^{-4}$

- по шкале сухих веществ по сахарозе, %

$\pm 1,0$

- по средней дисперсии

$\pm 2 \cdot 10^{-4}$

Сходимость показаний:

- по шкале показателей преломления

$1 \cdot 10^{-4} n_D$

- по шкале сухих веществ по сахарозе, %

0,1

Габариты, мм

400 x 180 x 260

Масса, кг

7,5

4 Рефрактометр пищевой лабораторный РПЛ-2

Рефрактометр служит для определения показателя преломления n_D жидкости и содержание сухих веществ по сахарозе в продуктах сахарной, хлебобулочной отраслей.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон измерения показателя преломления

1,2 ... 1,7

Предел допускаемой основной погрешности

$\pm 1 \cdot 10^{-4}$

Диапазон измерения массовой доли сухих веществ (сахарозы), %

0 ... 85

Габаритные размеры, мм

250 x 115 x 270

Масса, кг

3,5

5 Анализатор «КЛЕВЕР-1М»

Прибор служит для контроля качества молока и молочных продуктов. Обеспечивает измерение в молоке и сливках массовой доли жира, сомо и плотности. В режиме измерения пробу молока заливают в кювету, где, ее последовательно нагревают до двух заданных температур, при каждой из которых определяют скорость ультразвука. На основе полученных данных микро ЭВМ автоматически вычисляет значения показателей контролируемых, которые отражаются на цифровом индикаторе прибора.

Метрологические и техническая характеристика прибора «Клевер – 1М»	
Метод измерения	ультразвуковой
Диапазон измерений массовых долей жира, %	0 ... 20
для сомо	6 ... 12
Плотность, кг/м ³	1000...1040
Составляющая абсолютной погрешности при измерении в молоке	
жира, %	0,02
сомо,	0,02
Плотность, кг/м ³	0,2
Предел абсолютной погрешности при измерении	
в молоке жира в диапазоне 0 ... 10 %, не более	± 0,91
Габаритные размеры, мм	115 x 80 x 290
Масса, кг	1,3

6 Анализатор молока «ЛАКТАН 1-4»

Предназначен для измерения массовой доли жира, сомо, плотности.

После установки стаканчика с пробой молока в положение измерения, включается кнопка «пуск», выдается сигнал на узел управления поршневым микронасосом. Происходит забор пробы в измерительную ячейку и термостатируется при $t = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем измеряют частоту генератора, которая пропорциональна скорости распространения скорости ультразвука. По значениям найденных частей микро ЭВМ вычисляет массовые доли жира и сома, значение которых отображаются на индикаторах (каждые 5 с).

Метрологические и технические характеристики	
Метод измерения	ультразвуковой
Диапазон измерений массовых долей жира, %	0 ... 6
сомо, %	6 ... 12
СКО случайной составляющей абсолютной погрешности при измерении массовых долей жира, %	0,04
сомо, %	0,02
Предел абсолютной погрешности при измерении	
жира, %	не более $\pm 0,15$
Габаритные размеры, мм	250 x 100 x 250
Масса, кг	2,4

7 Автоматический пенетрометр ПМДП

Прибор служит для определения структурно-механической характеристики (консистенции) вязкопластичных и упругоэластичных продуктов. Пенетрометр обеспечивает измерение двух параметров – пенетрации и максимальной глубины погружения индентора, по величине

которой рассчитывают предельное напряжение сдвига. Для определения применяют конические инденторы с углом при вершине 60 и 90 °.

Метрологические и технические характеристики

Ход индентора , мм	
рабочий	65
общий	70
Глубина погружения индентора, мм	0,1
Дискретность в режиме контроля , мм	0,1
Погрешность настройки силоизмерительных гильз, %	3
Время измерения, с	
пенетрации	5
максимального погружения	60
Габаритные размеры, мм	320 x 240 x 543
Масса, кг	10,9

8 Белкомер «УГЛИЧ»

Прибор предназначен для определения массовой доли белка в молоке и молочных продуктах.

Метрологические и технические характеристики

Метод измерения	фотоколориметрический
Диапазон измерения массовой доли белка, %	2,5 ... 4,4
Дискретность отсчета, %	0,05
Основная абсолютная погрешность, %	± 0,15
Производительность, час	30 анализов
Габаритные размеры, мм	264 x 252 x 112
Масса, кг	4,5

9 Индикатор соматических клеток и вискозимер ИСКМ – 1

Данный прибор применяется для измерения числа, соматических клеток в молоке (выявление молока коров, больных маститом). Методика измерения предусматривает смешивание пробы молока с препаратом «мастоприм» и определение вязкости смеси. В зависимости от числа соматических клеток в молоке изменяется вязкость смеси.

Смешивание пробы и «Мастоприма» осуществляется вручную и затем смесь сливают в воронку. Время истечения определяется с помощью электронного блока индикации.

Метрологические и технические характеристики

Метод измерения	вискозиметрический
Диапазон измерения числа соматических клеток в 1 см ³ , тыс	0 ... 1500
Время протекания смеси (условная вязкость), с	0.1 ... 99.9
Объем пробы, см ³	15
Габаритные размеры, мм	150 x 145 x 60

10 Анализатор соматических клеток «САМАТОС»

Прибор используется также для измерения числа соматических клеток в молоке.

Анализатор состоит из автоматического узла подготовки и перемешивания пробы. Цифровой индикатор прибора фиксирует условную вязкость (время истечения смеси через капиллярное отверстие) и число соматических клеток в тыс/см³.

Метрологические и технические характеристики

Метод измерения	вискозиметрический
Диапазон измерения числа соматических клеток в 1 см ³ , тыс	90 ... 1500
Время протекания смеси (условная вязкость), с	0,1 ... 99,9
Предел основной относительной погрешности измерения условной вязкости	± 0,5
Масса, кг	9,0

11 Комплект устройств для определения массовой доли влаги. Выпариватель влаги ВВМ – 1

Прибор предназначен для определения массовой доли влаги в сливочном масле.

Состоит из нагревателя и электронного блока. Нагреватель имеет два гнезда для установки стаканчиков с навесками масла, датчик измерения температуры и контрольный термометр электронный блок обеспечивает стабилизацию заданной температуры процесса выпаривания. Он имеет индикатор нагрева кнопки пуска таймера. Устройство ВВМ – 1 позволяет выпаривать влагу одновременно из двух проб.

Метрологические и технические характеристики

Метод измерения	выпаривание влаги
Температура термостатирования, °С	160 ± 3
Время выпаривания, с	300 ± 20
Диапазон установки температуры термостатирования, °С	100 ... 180
Масса пробы, г	10
Габаритные размеры, мм	
блока электронного	143 x 115 x 75
нагревателя	183 x 98 x 84
Масса устройства, кг	3

12 Весы лабораторные квадратные 4-го класса модели ВЛКТ – 500 г – М

Данные весы с механизмом компенсации тары предназначены для взвешивания вещества при проведения лабораторных анализов. Принцип взвешивания на весах основан на уравнивании момента, создаваемого взвешиваемым грузом, моментом, создаваемым отклонением квадранта и встроенными гирями.

По конструкции прибор предоставляет собой двухпризменные весы с верхним расположением чашки и полным механизмом гиреналожением. Весы имеют механизм компенсации тары, который служит для ускорения процесса взвешивания.

Метрологические и технические характеристики

Наибольший предел взвешивания, г	500
Цена деления шкалы, г	1
Дискретность отсчета, мг	10
Диапазон взвешивания по шкале, г	0 – 100
Пределы допускаемой погрешности, мг	± 20
Время успокоивания квадранта, с	8
Масса весов, кг	10
Габаритные размеры, мм	370 x 220 x 355

Соответствуют ГОСТ 24104-88Е «Весы лабораторные и общего назначения. Общие технические условия».

13 Весы маслопробные 84 М

Маслопробные весы представляют собой одночашечные весы с неравноплечим коромыслом и гирями - рейтерами. Они имеют стойку с отсчетной шкалой, футляр, коромысло, процентную шкалу, арретир, серьгу и навеску.

Для определения влаги в сливочном масле после термостатирования пробы и выпаривания ее взвешивают на данных весах, шкала которых градуирована в процентах влаги.

Метрологические и технические характеристики

Пределы взвешивания, г	5 – 10
Погрешность определения влаги для навески 5 г, %	± 0,1
для навески 10 г	± 0,05
Масса, кг	2,5
Габаритные размеры, мм	465 x 160 x 260

14 Электронные цифровые весы 4-го класса модели ВБЭ – 1 кг

Существенное преимущество весов состоит в том, что при операциях не требуются встроенные или накладные гири.

В весах имеется электронное устройство, компенсирующее силовое воздействие, создаваемое тарой. Величина изменения выводится на блок индикации.

Метрологические и технические характеристики

Наибольший предел взвешивания, г	1000
Дискретность цифрового отсчета, мг	10
Наибольшая допускаемая погрешность взвешивания, мг	± 30
Среднеквадратическое отклонение показателей, мг	10
Время установления показаний, с	4
Масса, кг	17
Габаритные размеры, мм	426 x 230 x 210

15 Электронные цифровые весы 4-го класса ВЛЭ – 1 кг

Эти весы могут быть широко использованы в замкнутых технологических процессах. Имеется выход для подключения цифropечатающих устройств, и ЭВМ, полуавтоматическая калибровка и компенсация массы тары по всему диапазону взвешивания.

Метрологические и технические характеристики

Наибольший предел взвешивания, г	1000
Дискретность цифрового отсчета, мг	10
Наибольшая допускаемая погрешность взвешивания, мг	± 30
Среднее квадратическое отклонение показаний, мг	10
Время установления показаний, с	1,5
Масса, кг	8
Габаритные размеры, мм	320 x 200 x 110

16 Весы рычажные пастальные циферблатные РН – 10 Ц 13 У

Весы предназначены для взвешивания продуктов и товаров общей массой от 0,1 до 10 кг. Метод поверки по ГОСТ 8.453-82, имеется комплект гирь 5-го класса по ГОСТ 7328-01.

Метрологические и технические характеристики

Пределы взвешивания, г	
наибольший	10000
наименьший	100
Наибольший предел показаний по шкале, г	1000
Число делений шкалы	200
Цена деления шкалы, г	5

17 Передвижные гирные весы РП 500 Г 13 М

Весы предназначены для взвешивания больших грузов, соответствуют ТУ 25-7162.001-86.

Метрологические и технические характеристики	
Пределы взвешивания, кг	25 ... 500
Конечное значение коромысла, кг	10
Цена деления шкалы коромысла, г	200
Допускаемая погрешность в интервалах взвешивания, г	
от 25 кг до 100 кг	± 100
от 100 кг до 400 кг	± 200
от 400 кг до 500 кг	± 300

18 Весы для сыпучих материалов ВСМ

Весы соответствуют ТУ 64-1-3849-84 и предназначены для измерения массы преимущественно порошкообразных веществ в лабораториях. Подлежат периодической поверке по ГОСТ 8.520-84

Метрологические и технические характеристики	
Предел взвешивания, кг	
наименьший	1
наибольший	5
Предел допускаемой основной погрешности, мг	± 10

19 Весы технические аптечные до 1 кг ВА –4

Весы предназначены для взвешивания от 100 г до 1 кг и применяются в аптеках и лабораториях. Предназначены для эксплуатации при температуре от + 10 до + 35 °С, относительной влажности 80 %.

Метрологические и технические характеристики	
Диапазон измерений, кг	0,10... 1
Допускаемая погрешность, мг	
при 10 % нагрузке	± 50
при 100 % нагрузке	± 100
Масса, кг	3,4
Габаритные размеры, мм	493 x 465 x 172

20 Лабораторные технические весы типа ВЛТ 1-го класса

Весы лабораторные технические 1 класса модели ВЛТ – 1 кг – 1 предназначены для определения массы драгоценных камней, металлов, а также обычного взвешивания в различных лабораториях.

Таблица Д1 - Метрологические и технические характеристики

Наименование параметров	Номинальное значение	Действительное значение
1. Наибольший предел взвешивания, кг	1	
2. Цена деления шкалы, мг/дел., не более		
а) без нагрузки	10	8
б) при 10 % нагрузке	10	-
в) при 100 % нагрузке	10	6
3. Вариация показаний весов, мг, не более	5	1
4. Погрешность из-за неравноплечности, мг, не более		
а) при 10 % нагрузке	± 10	-
б) при 100 % нагрузке	± 10	6
5. Диапазон измерения массы с помощью гиревого механизма, мг	от 10 до 990	
6. Время успокоения колебаний коромысла, с., не более	50	
7. Значения массы встроенных гирь, мг	500 $\pm$ 0,5 300 $\pm$ 0,5 200 $\pm$ 0,5 100 $\pm$ 0,5 50 $\pm$ 0,5 30 $\pm$ 0,5 20 $\pm$ 0,5 10 $\pm$ 0,5	
8. Габаритные размеры, мм	500 x 390 x 540	
9. Масса, кг	20	

21 Лабораторные технические весы ВЛТ – 200г 2-го класса

Лабораторные технические весы ВЛТ – 200 г представляют собой коромысловые равноплечие весы с ручным наложением гирь и визуальным отсчетом показаний стрелки по шкале. Весы снабжены изомером, служащим для освобождения от нагрузки и отвесом – грузом с заостренным концом, необходимым для правильной работы весов.

Весы предназначены для проведения анализов в лабораториях.

Метрологические и технические характеристики

Наибольший предел взвешивания, г	200

Цена деления отсчетной шкалы, мг	50

Допустимая погрешность при наибольшем пределе взвешивания, мг	± 50

Диаметр чашек, мм	90

22 Пурка литровая

Данный прибор используется в пищевой промышленности для определения натуры зерна – одного из показателей качества сырья муки. Натура – масса 1 л зерна, выраженная в граммах. Прибор имеет в составе комплект гирь.

Метрологические и технические характеристики

Вместимость, л 1

Погрешность весов пурки, мг

при подвешенных к коромыслу весов чашки для гирь
и мерки

500

при нагруженных весах гирями массой

1 кг

500

Габаритные размеры, мм

500 x 315 x 625

Масса, кг

12,2

23 Ареометр – сахариметр АСТ – 1

К ареометрам для измерения массовой доли сухих веществ в растворах относятся сахарометры, градуированные по массовой доле сухих веществ сахара.

Прибор, помимо основной структуры ареометра имеет для удобства пользования встроенный термометр. Выпускается в соответствии с ГОСТ 18481 – 81.

Метрологические и технические характеристики

Пределы измерения встроенного термометра, °C 0 – 40

Цена деления шкалы термометра, °C 1

Предел допускаемой погрешности температуры, °C 0,5

Диапазон показаний ареометра, % по массе 0 - 8

Диапазон измерения концентрации, % по массе 0 – 24

Цена деления шкалы, % по массе 0,05

Предел допускаемой погрешности, % по массе 0,05

Общая длина ареометра, мм 455

Длина шкалы, мм не менее 192

24 Фотоэлектрический концентрационный колориметр КФК – 2

Данный прибор предназначен для измерения в отдельных участках диапазона длин волн 315 – 98 нМ, выделяемых светофильтрами, коэффициентов пропускания и оптической плотности жидкостных растворов и твердых тел, для определения концентрации пищевых продуктов.

Метрологические и технические характеристики

Пределы измерения, %

коэффициентов пропускания

от 100 до 5

оптической плотности

0 – 1,3

Абсолютная погрешность, %	не более ± 1
Случайная погрешность, %	не более 0,3

25 Анемометр М – 92

Анемометр предназначен для измерения средней скорости ветра в хлебопекарной и мукомольной промышленности. Измерение величин производят за выбранный интервал времени, но не менее 2 мин.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон измерения, м/с	0,6 – 40
Цена деления шкалы, м/с	0,1
Погрешность измерения, м/с	$\pm 0,5$
Начальная чувствительность, м/с	не более 0,5
Габаритные размеры, мм	280 x 420

26 Цветоанализатор «ЦВЕТАН»

Цветоанализатор предназначен для определения цветовой коррекции и времени экспонирования при цветной проекционной фотопечати по субстративному способу.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон относительной оптической плотности, %	от –80 до 70
Погрешность измерения, %	± 5
Время срабатывания, с	от 0,4 до 63
Габаритные размеры, мм	300 x 240 x 150

27 Часы настольные процедурные с электрическим звуковым сигналом ПЧ – 2

Часы изготовлены Новоаннинским заводом электромедицинской аппаратуры, соответствуют ТУ 64–1–1622-77.

Предназначены для контроля длительности процедур, имеют механизм с суточным заводом. Электрическое устройство часов обеспечивает подачу звукового сигнала после обработки любого интервала времени.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон измерения, мин	0 – 60
Цена деления, мин	1
Длительность звукового сигнала, с	от 10 до 55
Погрешность измерения, с	$\pm 0,5$

28 Иономер лабораторный И – 160

Иономер предназначен для измерения активности одновалентных и двухвалентных анионов и катионов, ионов водорода, окислительно-

восстановительных потенциалов и температуры в водных растворах проб пищевых продуктов и разных технологических растворов.

Работа прибора основана на преобразовании ЭДС электродной системы и других источников ЭДС в пропорциональное по величине напряжение, преобразуемое в дальнейшем в цифровой код и аналоговый сигнал. Математические преобразования выполняются микропроцессором. Электродная система состоит из электрода сравнения (хлорид серебряный) и измерительного ионселективного электрода.

Метрологические и технические характеристики	
Диапазон измерения преобразователя $P^H(P^X)$	от - 4 до + 20
Температуры, °C	от 0 до 100
ЭДС, мВ	от - 3000 до + 3000
Основная абсолютная погрешность в режиме измерения $P^H(P^X)$	$\pm 0,01$
температуры, °C	$\pm 0,2$
ЭДС, мВ	± 1
Масса, кг	3,5
Габаритные размеры, мм	300 x 225 x 48,5

29 PH – Метр – иономер – «ЭКОТЕСТ – 110»

Данный прибор служит для измерения p^H , p^{NH_4} , p^{Cl} . Он комплектуется лабораторным или погружным датчиком для измерения p^H в емкости или комбинированным электродом, где совмещены измерительный электрод и электрод сравнения.

Метрологические и технические характеристики	
Применяемые электроды	p^{NA} , p^{NH} , p^{CL}
Диапазон измерений, мг/см ³	
Na^+	от 35 до 130
NH_4	от 1 до 25
Cl^-	от 90 до 250
PH	от 1 ... 19,9
Предел основной погрешности преобразователя	$\pm 0,02$
Время измерения, с	10
Масса, кг	0,5
Габаритные размеры, мм	220 x 90 x 40

30 Анализатор качества сред КС МК «ЛУЧ»

Данный p^H -метр создан международной компанией «Луч» и ВНИМИ. В комплект прибора входит набор бинированных ионоселективных электродов – датчиков для измерения p^H , p^{Na} , p^{NH_4} , p^{Cl} и p^{Na} .

Метрологические и технические характеристики	
Метод измерения	ионометрический

Диапазон измерения прибора: $p^H(p^X)$	от 1 до 14
Температуры °C	от 0 до 100
Время измерения, с	10
Предел основной допускаемой погрешности	$\pm 0,05$

31 РН - метр – милливольтметр P^H – 150 М

Прибор предназначен для использования в лабораториях предприятий. Состоит из двух бионов: измерительного (высокоомный преобразователь) и датчика (электродная система со стеклянным измерительным электродом и хлорсеребряным электродом сравнения, в виде комбинированного электрода).

Метрологические и технические характеристики

Метод измерения	ионометрический
Диапазон измерения p^H	1 ... 14 с приведением к температуре 20 °C
Предел основной погрешности	$\pm 0,05$
Предел основной погрешности контроля для температуры, °C	$\pm 0,05$
Масса, кг	0,5
Габаритные размеры, мм	150 x 70 x 35

32 РН – метр милливольтметр

В основу работы прибора положен потенциометрический, ионометрический метод измерения P^H E_h (окислительно-восстановительного потенциала), контролируемого раствора и температуры.

Метрологические и технические характеристики

Диапазоны измерения: $p^H(p^X)$	от – 1 до + 14
E_h , мВ	от – 1999 до 1999
Температура, °C	от – 10 до + 100
Цена деления: $p^H(p^X)$	0,01
E_h , мВ	1,0
Температура, °C	1,0
Абсолютная погрешность $p^H(p^X)$	$\pm 0,05$
E_h	-
Температура, °C	± 2

33 Термометр цифровой “ВАПАН”

Предназначен для оперативного измерения температуры пищевых продуктов, находящихся в жидком, сыпучем, пастообразном состоянии.

Представляет собой переносной прибор с цифровым отсчетом показаний температуры в °C и обеспечивает автоматическую индикацию на табло.

Метрологические и техническая характеристика

Рабочая часть термодатчика – щуп, мм	3 x 100
Диапазон измеряемых температур, °C	от – 50 до + 125

Погрешность $\pm 0,5$

34 Термометр переносной цифровой ТМЦ – 9210

Термометр применяют для измерения температуры молока и молочных продуктов. Состоит из температурного датчика на основе термопреобразователя сопротивления, зарядного устройства. В комплект входит игольчатый датчик для жидких, либо замороженных продуктов.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон измерения температур, °C от – 50 до + 200

Основная допустимая погрешность измерения, °C $\pm 0,35$

Размеры датчика, мм:

диаметр 3

глубина погружения 130

Масса, г 120

35 Инфракрасный галогенный влагомер HR – 73

Данный влагомер обеспечивает измерение влажности сухих сыпучих молочных продуктов, сухих материалов растительного, минерального происхождения.

Пробу продукта высушивают с помощью инфракрасной лампы, взвешивают остаток пробы после удаления влаги, изменение массы вычисляется автоматически. Результаты измерения влажности автоматически выдаются в виде распечатки.

Метрологические и технические характеристики

Метод измерения инфракрасная сушка

Диапазон измерения влажности, % 2 ... 20

СКО случайной составляющей, % 0,2

Масса пробы, г 10

Время измерения, мин 2 ... 30

Масса, кг 10

Габаритные размеры, мм 270 x 310 x 400

36 Электронно-цифровой влагомер зерна «КОЛОС – 1»

Данный прибор предназначен для экспрессного измерения естественной влажности зерна по ГОСТ 22261 – 94.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон измерения влажности, % от 8 до 35

Дискретность отсчета, % 0,1

Предел основной допускаемой погрешности, % $\pm 0,1$

Допускаемая системная погрешность, % не более $\pm 0,05$

Габаритные размеры, мм 210 x 115 x 190

Масса, кг

1,5

37 Влагомер ВП – 4

Влагомер предназначен для определения влажности пищевых продуктов (кукурузы, ржи, проса). Широко применяется в хлебоприемных пунктах предприятий. В комплект входит пресс винтовой. Устройство влагомера основано на измерении теплопроводности зерна в зависимости от влажности.

Метрологические и технические характеристики

Пределы измерения, % от 12 до 22

Основная погрешность, % не более $\pm 1,5$

Максимальная погрешность влагомера, %

при влажности до 17 % ± 1

при влажности более 17 % $\pm 1,5$

Допускаемая сходимость показаний, % не более 0,2

38 Термостат электрический суховоздушный ТС 1/80 СПУ

Изготовлен АО «Смоленское СКТБ СПУ», заводской номер № 305, в соответствии ТУ 9452 – 02 – 00141798 – 97.

Предназначен для получения и поддержания внутри рабочей камеры стабильной температуры, необходимой для проведения исследований.

Термостат обеспечивает непрерывное измерение температуры в рабочей камере и ее визуальную индикацию.

Метрологические и технические характеристики

Максимальный температурный диапазон

термостатирования, °С до + 60

Время установления рабочего режима, мин не более 120

Время непрерывной работы, ч 500

Максимальное отклонение температуры в любой точке

рабочей камеры, °С $\pm 0,4$

39 Ультратермостат УТ 15

Ультратермостат предназначен для получения стабильной температуры в камерах работы при лабораторных исследованиях.

Диапазон рабочих температур, °С от 0 до + 150

Время нагрева, мин 60

Погрешность в интервале

0 °С до температуры окружающего воздуха $\pm 0,5$

от температуры окружающего воздуха до + 45 °С $\pm 0,05$

от + 45 °С до + 60 °С $\pm 0,02$

от 60 °С до 100 °С $\pm 0,1$

от 100 °С до 150 °С $\pm 0,5$

Габаритные размеры, мм

470 x 430 x 630

40 Термостат водяной многоцелевого назначения

Термостат предназначен для подогрева проб молока при проведении анализа на редуктазную пробу, определения массовой доли жира.

Очень компактен, обладает высокой точностью поддержки температуры.

В структуре имеет сосуд (8л), датчик для измерения температуры, нагревательный элемент.

Метрологические и технические характеристики

Рабочая температура

95 – (t + 5)

где t – температура, окруж. среды, °C

Погрешность термостата, °C

± 1

Масса, кг

5

Габаритные размеры, мм

310 x 290 x 178

41 Ротационный вискозиметр типа RN

Данный прибор выпускается фирмой «Прюфгеретевеке», имеет три измерительные системы, состоящие из цилиндров различного радиуса и длины.

Служит для измерения вязкости пищевых продуктов и сырья при повышенных скоростях сдвига для средне- и высоковязких продуктов.

Метрологические и технические характеристики

Предел измерения вязкости, Па °C

от 10^{-2} до 420

Напряжение сдвига, Па

от 5,0 до 1500

Погрешность, %

не более ±5

Скорость сдвига, c^{-1}

от 5 до 492

Габаритные размеры, мм

0,25 x 0,28 x 0,44

Соответствует ГОСТу 1532-81Е «Вискозиметр для определения условной вязкости. Технические условия».