

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет
Кафедра общей физики

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

А. Д. Косинов, А. Г. Костюрина, О. А. Брагин

ВВЕДЕНИЕ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Новосибирск
2016

УДК 53(075.8)
ББК ВЗв672я73-5
К 712

Рецензент
канд. физ.-мат. наук, проф. А. А. Кочеев

Издание подготовлено в рамках реализации *Программы развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный университет»* на 2009–2018 годы.

Косинов А. Д.

К 712 Введение в измерительный практикум (Измерительный практикум) : учеб. пособие / А. Д. Косинов, А. Г. Костюрина, О. А. Брагин ; Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2016. – 87 с.

ISBN 978-5-4437-0545-3

В предлагаемом учебном пособии приводится аннотированное изложение лабораторных работ «Измерительного практикума» кафедры общей физики ФФ НГУ. Даются методические рекомендации по подготовке к выполнению лабораторных работ, обработке результатов измерений и оформлению отчёта. Особое внимание уделено оценкам погрешностей, работе с размерными величинами и табличными данными.

Учебное пособие содержит справочные данные по основным, дополнительным и производным единицам измерения в системе СИ, некоторые основные физические постоянные, а также табличные значения физических величин, определяемых студентами при выполнении соответствующих лабораторных работ.

Пособие предназначено для преподавателей измерительного практикума и студентов первого курса физического, геолого-геофизического факультетов, второго курса факультета естественных наук, медицинского факультета, факультета информационных технологий, а также может быть использовано при обучении студентов других естественнонаучных и технических факультетов.

УДК 53(075.8)
ББК ВЗв672я73-5

ISBN 978-5-4437-0545-3

© Новосибирский государственный университет, 2016
© А. Д. Косинов, А. Г. Костюрина, О. А. Брагин, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Содержание и задачи измерительного практикума	5
Подготовка к проведению эксперимента	6
Планирование выполнения лабораторных работ	6
Выполнение измерений	7
Запись результатов и обработка данных	7
Основные термины и определения	9
Рекомендации по обработке измерений и записи результатов	13
Графическое представление экспериментальных результатов	22
Основные принципы измерений	26
Измерение физических величин	26
Измерительная система	28
<i>Структура измерительных систем</i>	28
<i>Характеристики измерительной системы</i>	31
Аннотированное представление работ	33
Работы 1.1–1.2. Измерение случайных величин	33
<i>Работа 1.1. Измерение стационарных случайных величин и статистическая обработка результатов</i>	33
<i>Работа 1.2. Определение энергии образования ион-электронной пары α-частицами в воздухе</i>	35
Работы 2.1–2.3. Основы измерений в электрических цепях	36
<i>Работа 2.1. Электроизмерительные приборы и источники питания постоянного тока</i>	36
<i>Работа 2.2. Основы измерений в цепях переменного тока</i>	37
<i>Работа 2.3. Автоматизированные измерения лабораторным комплексом NI ELVIS</i>	38
Работы 3.1–3.2. Изучение работы осциллографа	39
<i>Работа 3.1. Измерения с помощью цифрового запоминающего осциллографа</i>	40
<i>Работа 3.2. Измерения с помощью электронно-лучевого осциллографа</i>	41
Работы 4.1–4.2. Компенсационные методы измерений	42
<i>Работа 4.1. Измерение напряжений потенциометром</i>	42
<i>Работа 4.2. Мостовые методы измерения сопротивлений</i>	43
Работы 5.1–5.2. Измерение скорости звука в воздухе	44
<i>Работа 5.1. Измерение скорости звука в воздухе методом бегущей волны</i>	44
<i>Работа 5.2. Измерение скорости звука в воздухе методом стоячей волны</i>	45

Работа 6. Измерение скорости звука в твердых средах методом соударения стержней.....	47
Работа 7. Измерение ускорения свободного падения	48
Работы 8.1–8.2. Измерение электрических величин в цепях постоянного и переменного тока	49
Работа 9. Методы измерения температуры	50
Работа 10. Датчики для цифровых и аналоговых измерений	51
Специализированные работы для студентов медицинского факультета и факультета естественных наук по специальности биология.....	52
Работы по электрофизиологической диагностике	53
<i>Работа М1. Электромиография на верхней части руки.....</i>	<i>53</i>
<i>Работа М2. Рефлекс растяжения мышц и определение скорости проводимости</i>	<i>54</i>
<i>Работа М3. Электрокардиография</i>	<i>55</i>
Аппараты с преобразователями для функциональной диагностики	56
<i>Работа М4. Фонокардиография</i>	<i>56</i>
<i>Работа М5. Измерение артериального давления</i>	<i>58</i>
<i>Работа М6. Измерение температуры кожи руки при курении</i>	<i>60</i>
<i>Работа М7. Регуляция температуры тела человека</i>	<i>62</i>
Аппараты для функциональной диагностики с использованием стимуляторов.....	63
<i>Работа М8. Диагностика слуха.....</i>	<i>63</i>
<i>Работа М9. Определение поля зрения глаза</i>	<i>65</i>
<i>Работа М10. Разрешающая способность глаза</i>	<i>67</i>
<i>Работа М11. Смещение цветов и маскирование цвета</i>	<i>68</i>
Справочные данные	69
Рекомендуемая литература	84

Содержание и задачи измерительного практикума

Среди практикумов кафедры общей физики измерительный практикум занимает особое место, так как в нём студенты обучаются основам проведения физического эксперимента. На первой стадии обучения студенты знакомятся с различными электроизмерительными приборами, приобретают навыки работы с ними, используют их для различных измерений, накапливают опыт в постановке и проведении эксперимента, а также в обработке полученных данных. В лабораторных работах на примерах конкретных физических явлений подобраны задания для изучения методов измерений и использования приборов.

Измерительный практикум – это комплекс базовых лабораторных работ, выполняемых студентами для изучения:

- 1) методов измерений наиболее типичными и современными приборами;
- 2) способов оценки погрешностей измерений;
- 3) правил представления результатов измерений.

После прохождения практикума студенты должны уметь планировать и выполнять измерения изученными приборами.

Основная задача практикума – познакомить студентов с наиболее распространёнными методами измерения физических величин.

Процесс обучения студентов состоит из:

- подготовки к работе,
- выполнения измерений или экспериментов,
- обработки результатов измерений,
- защиты отчёта.

При работе в практикуме студенту необходимо:

- освоить методику сборки и проверки электрических цепей, обнаружения неисправностей;
- получить навыки использования основных измерительных приборов, осциллографов и некоторых источников питания;
- научиться обрабатывать результаты измерений с учётом случайных и систематических погрешностей;
- грамотно вести рабочие записи при выполнении эксперимента и правильно представлять окончательные результаты измерений в виде расчётных формул, таблиц, графиков и численного результата;

- провести анализ используемого метода измерения с целью выбора соответствующих приборов и повышения его точности.

В некоторых работах практикума измеряются неэлектрические величины, такие как температура, скорость, давление и т. д. Методов и приборов для измерения неэлектрических величин существует много. В практикуме выбраны те, в которых неэлектрическая величина сначала преобразуется в электрическую, а затем измеряется.

В измерительном практикуме занимаются студенты пяти факультетов НГУ: физического, геолого-геофизического, медицинского, факультета естественных наук и факультета информационных технологий. Программа обучения студентов нефизических специальностей включает некоторые лабораторные работы для студентов физического факультета и специализированные работы для студентов соответствующего факультета. Например, для студентов медицинского факультета и факультета естественных наук по специальности биология имеется 11 специальных лабораторных работ (семь автоматизированных работ по диагностике сердечно-сосудистой системы и мышц и четыре работы по диагностике слуха и зрения человека).

Подготовка к проведению эксперимента

Для осмысленного, а, следовательно, правильного проведения эксперимента необходимо изучение описания работы до прихода в практикум. Невыясненные при подготовке вопросы желательно обсудить с преподавателем или студентом, уже выполнившим эту работу. При хорошей предварительной подготовке работа будет выполнена правильно и быстро.

Из описаний и рекомендуемой литературы необходимо понять цель работы, метод измерения, обратив внимание на возможные ограничения, разобраться в схеме, выяснить смысл измеряемой величины, принцип работы приборов, пределы метода, его достоинства и недостатки.

По возможности самостоятельно получить используемую расчётную формулу и формулу для расчёта погрешности.

Погрешности измерительных приборов необходимо оценить до проведения измерения, чтобы при записи результатов оставлять правильное количество значащих цифр.

Планирование выполнения лабораторных работ

Для выполнения лабораторных работ необходимо предварительно изучить теорию используемого метода и правильно спланировать эксперимент. При этом очень важно исключить или хотя бы свести к минимуму воздействие внешних факторов на процесс измерения.

Если имеется несколько способов получения результата, то необходимо выбрать наиболее оптимальный, то есть тот, который обеспечит необходимую точность при минимальных затратах времени и усилий. Особое внимание необходимо уделить рекомендациям по работе с приборами и оборудованием. Также нужно изучить порядок выполнения работы, который обеспечит уверенную регистрацию измеряемой величины.

Выполнение измерений

При сборке схем необходимо соблюдать следующие правила

Источники питания/сигналов подключаются к схеме с **выключенным сетевым тумблером**. Если в описании не указан предел измерения измерительного прибора, то необходимо установить максимальный (самый грубый) предел. Нужно внимательно следить за правильностью соединения измерительных приборов и источников питания в схеме.

При измерении какой-либо зависимости, например, зависимости амплитуды от частоты $A(f)$, необходимо предварительно бегло пройтись по всему предполагаемому диапазону, оценить места резких изменений (особые точки, области) и общее поведение зависимости. После этого выбирается шаг измерения (в данном случае – по частоте): на плавных участках шаг берется реже, в особых областях – значительно чаще.

Если при выполнении работы произошло резкое отклонение значения измеряемой величины от предполагаемого, то необходимо проверить схему, работу приборов, а затем продолжить или повторить измерения.

Запись результатов и обработка данных

Все условия выполнения заданий, схемы и исходные экспериментальные данные должны записываться в рабочую тетрадь. Не допускается запись на отдельных листочках, потому что они, во-первых, как правило, теряются, во-вторых, при переписывании часто появляются ошибки, поэтому эксперимент необходимо будет проводить заново.

Соблюдайте следующие правила оформления:

1. Расчётные формулы, схемы, исходные данные необходимо сразу занести в рабочую тетрадь.

2. Следует также записать тип используемых приборов, их характеристики (например, класс точности, входное сопротивление, цену деления и так далее).

3. Все результаты следует заносить в таблицы: исходные параметры, непосредственно измеренные величины с указанием их размерности, а также основанные на них расчётные данные.

4. Поскольку графики нагляднее таблиц, то по возможности необходимо представлять результаты эксперимента в графическом виде, при этом разумно выбирая масштаб осей координат и начало отсчёта.

Структура отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- список используемой аппаратуры, с указанием марки, класса точности, диапазона или цены деления;
- схему установки;
- расчётные формулы;
- таблицы числовых значений с указанием единицы измерений;
- обработанные результаты с указанием абсолютной и относительной погрешности;
- графическое представление результатов.

При выполнении вышеуказанных рекомендаций можно приступить к защите отчёта.

Защита лабораторной работы

Для защиты работы студент должен знать:

- Физическую сущность работы.
- Метод и схему измерений.
- Достоинства и недостатки методики, способы её улучшения.
- Источники и составляющие погрешности, способы её уменьшения.

Основные термины и определения

Для того чтобы научиться грамотно выполнять измерение физических величин, простых знаний физики или понятий недостаточно. Для количественных измерений есть свои определения и термины. Это особый язык для экспериментатора.

Система физических величин – это совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин¹. Для определенности в названии системы величин применяют символы величин, принятых за основные. Например, система величин механики, в которой в качестве основных приняты длина L , масса M и время T , должна называться системой LMT, а система основных величин, соответствующая Международной системе единиц (СИ), должна обозначаться символами LMTIΘNJ, обозначающими соответственно символы основных величин – длины L , массы M , времени T , силы электрического тока I , температуры Θ , количества вещества N и силы света J .

Размерность физической величины – это выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1. Степени символов основных величин могут быть целыми, дробными, положительными и отрицательными. Размерность величин принято обозначать знаком \dim . Например, в системе величин LMT размерность величины P будет: $\dim P = L^l M^m T^t$, где L, M, T – символы величин, принятых за основные.

Основными единицами Международной системы единиц (СИ) являются: метр (м), килограмм (кг), секунда (с), ампер (А), кельвин (К), моль (моль) и кандела (кд). Единица производной физической величины системы единиц образуется в соответствии с уравнением, связывающим её с основными единицами или с основными и уже определёнными производными.

Под измерением нужно понимать получение числового значения физической величины опытным путём с помощью подходящих для этого

¹Определения терминов в этой и следующей главах цитируются по РМГ-29-99ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. 1999 – 69 с.

технических средств измерения. В зависимости от цели измерений выбираются измеряемые физические величины, и определяется точность их измерения. Идеальный процесс измерения – это сравнение двух однородных физических величин: измеряемой и известной (меры). Например, прикладывая линейку с делениями к измеряемому предмету, сравнивают его размер с единицами длины, размеченными на линейке, производят отсчёт и получают значение измеряемой величины.

Выражение вида $R = r \dim R$ принято называть основным уравнением измерения. Здесь R – измеряемая физическая величина, а r – её числовое значение.

Измерение физической величины – это совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с её единицей и получение значения этой величины.

Рассмотрим основные типы измерений

Равноточные измерения – это ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью. Подразумевается, что прежде чем обрабатывать ряд измерений, необходимо убедиться в том, что все измерения этого ряда являются равноточными.

Неравноточные измерения – это ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях. В случае данного типа измерений обработка выполняется с учетом веса отдельных измерений, входящих в ряд.

Однократное измерение – это измерение, выполненное один раз. Чаще всего выполняют именно однократные измерения. Например, измерение конкретного момента времени по часам обычно производится один раз.

Многократное измерение – это измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, то есть состоящее из ряда однократных измерений.

Прямое и косвенное измерение. Измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно, называют **прямым измерением**. Этот термин является противоположным термину **косвенное измерение**, суть которого – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. Примеры прямых измерений: измерение диаметра проволоки микромет-

ром, измерение напряжения вольтметром, измерения массы тела с помощью весов. Измерение всегда прямое, если его рассматривать как сравнение величины с её единицей, что соответствует прямому методу измерения. Примером **косвенного измерения** или использования **косвенного метода измерений** можно рассматривать определение удельного сопротивления проводника ρ по результатам прямых измерений диаметра, длины проволоки l , а также её сопротивления R (в работе 4.2), связанных с удельным сопротивлением уравнением

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Иногда для определения искомых значений величин необходимо решать систему уравнений. В этом случае выполняются **совокупные измерения**. Обычно под этим подразумевают измерения нескольких одноимённых величин в разных сочетаниях. Например, измерения напряжения в цепи вольтметрами с различными входными сопротивлениями. Такие измерения выполняются в некоторых заданиях работы 2.1 и 2.2.

Если проводятся измерения двух или более не одноимённых величин для определения зависимости между ними, то такие измерения называются **совместными** (например, измерение вольтамперных зависимостей в работах 2.1, 2.2 и 2.3).

Важным моментом измерений является **наблюдение при измерении**, целью которого является своевременно и правильно произвести **отсчёт показаний средства измерений** по показывающему устройству средства измерений в заданный момент времени (например, выполнение задания 3 в работе 2.1).

При проведении измерений применяют разнообразные технические средства. Например, для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне в качестве средства измерений используют **измерительный прибор**. В простых измерениях, таких как измерение сопротивления резистора, ёмкости конденсатора и т. п., измерительный прибор является единственным средством измерения в **измерительной цепи**. В более сложных измерениях измерительная цепь может объединять несколько **измерительных приборов, измерительных преобразователей, датчиков** с целью измерения одной или более физических величин. Измерительная цепь может быть соединена с ЭВМ (ПК) и содержать разветвлённую структуру других технических средств. Если такая измерительная цепь собрана с целью выполнения конкретной задачи, то она образует **измерительную систему**. Во многих работах измерительного практикума используются именно измерительные системы (различного назначения). В основу большинства измерений положены какие-

то физические явления или эффекты, которые составляют суть различных **принципов измерений**.

Важной составляющей процесса измерений является **метод измерений**. Под **методом измерений** следует понимать приём или совокупность приёмов сравнения измеряемой физической величины с её единицей в соответствии с реализованным принципом измерений. Обычно метод измерений обусловлен устройством средств измерений. В работах измерительного практикума студенты знакомятся со следующими общепринятыми методами измерений.

1. **Метод непосредственной оценки**, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений (работы 2.1, 2.2).
2. **Метод сравнения с мерой**, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Например, измерение напряжения постоянного тока потенциометром, при котором производится сравнение измеряемого напряжения с известной ЭДС нормального элемента (работа 4.1).
3. **Нулевой метод измерений** – это метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Примером является измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием (работа 4.2).
4. **Контактный метод измерений** состоит в том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения. Например, измерение температуры тела термометром, термопарой (работы: 4.1, 9, М6, М7).
5. **Бесконтактный метод измерений** состоит в том, что чувствительный элемент средства измерений не приводится в контакт с объектом измерения. Примером является измерение температуры тела пирометром (работа 9) или измерение ускорения свободного падения (работа 7).

Под **методикой выполнения измерений** следует понимать выбранную совокупность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с гарантированной точностью в соответствии с принятым методом. Как правило, методика измерений подробно рассматривается в описаниях соответствующих работ измерительного практикума.

Рекомендации по обработке измерений и записи результатов

Результат измерения физической величины должен представлять значение измеряемой величины с указанием погрешности.

Погрешность результата измерения – это отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. На практике обычно используют действительное значение величины x_d , поскольку истинное (теоретическое) значение величины может быть неизвестно, в результате чего погрешность измерения $\Delta x_{\text{изм}}$ определяют по формуле

$$\Delta x_{\text{изм}} = x_{\text{изм}} - x_d,$$

где $x_{\text{изм}}$ – измеренное значение величины.

По характеру происхождения погрешности принято подразделять на систематические, случайные и грубые (промахи). Определение некоторых видов погрешностей согласно «РМГ-29-99ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» дано ниже.

Систематическая погрешность – это составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины. Систематическую погрешность можно определить или тщательным анализом измерительной системы, или проведением измерений по другому принципу и с использованием другой аппаратуры.

Инструментальная погрешность – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.

Погрешность метода измерений – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений. Погрешность метода иногда называют *теоретической погрешностью*. Иногда погрешность метода может проявляться как случайная.

Случайная погрешность – составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведённых с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины.

Субъективная погрешность измерения – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями экспериментатора.

Грубая погрешность/промах – это погрешность результата отдельного измерения (входящего в ряд измерений), которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда.

Погрешность результата однократного измерения – погрешность одного измерения (не входящего в ряд измерений), оцениваемая на основании известных погрешностей средства и метода измерений в данных условиях.

Пример: при однократном измерении микрометром диаметра проволоки получено значение, равное 2,02 мм. При этом ещё до измерения известно, что погрешность микрометра в данном диапазоне составляет $\pm 0,01$ мм, и погрешность метода (непосредственной оценки) в данном случае принята равной нулю. Следовательно, погрешность полученного результата будет равна $\pm 0,01$ мм в данных условиях измерений.

Рассеяние результатов в ряду измерений – несовпадение результатов измерений одной и той же величины в ряду равноточных измерений, возникающее из-за действия случайных факторов (погрешностей).

Прежде чем получить количественную оценку рассеяния результатов измерений, необходимо учесть поправки на действие систематических погрешностей. За оценки рассеяния результатов в ряду измерений принимают:

- размах,
- модуль средней арифметической погрешности,
- среднюю квадратическую погрешность или стандартное отклонение,
- доверительные границы погрешности или доверительную погрешность.

Размах результатов измерений – оценка, вычисляемая по формуле $R_n = x_{max} - x_{min}$, где x_{max} и x_{min} – наибольшее и наименьшее значение физической величины в данном ряду измерений (или выборке из n измерений).

Средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений – оценка S_x рассеяния единичных результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины около их среднего значения, вычисляемая по формуле

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}},$$

где x_i – результат i -го единичного измерения; \bar{x} – среднее арифметическое значение измеряемой величины из n единичных результатов.

По сути, здесь математическое определение для средней квадратической погрешности и среднего квадратического отклонения (СКО) результатов измерения относительно среднего значения совпадают. При обработке ряда результатов измерений, свободных от систематических погрешностей, средняя квадратическая погрешность и среднее квадратическое отклонение являются одинаковой оценкой рассеяния результатов единичных измерений.

Средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического

Оценка $S_{\bar{x}}$ случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений одной и той же величины в данном ряду измерений вычисляется по формуле

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}},$$

где S_x – средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений; n – число единичных измерений в ряду.

Доверительные границы погрешности результата измерений – это наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений.

Доверительные границы в случае нормального закона распределения вычисляются как $\pm tS_x$, $\pm tS_{\bar{x}}$, где S_x и $S_{\bar{x}}$ – средние квадратические погрешности единичного и среднего арифметического результатов измерений соответственно; t – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности p и числа измерений n . Можно использовать термины «*доверительная погрешность*» или «*погрешность при данной доверительной вероятности*».

Поправка – значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности. Знак поправки противоположен знаку погрешности.

Точность результата измерений характеризует качество измерения и отражает близость к нулю погрешности результата измерения.

Неопределённость измерений – параметр, характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине.

Таким параметром может быть стандартное отклонение (или число, кратное ему) или половина интервала, имеющего указанный доверительный уровень. Неопределённость может состоять из многих составляющих.

Некоторые из этих составляющих могут быть оценены стандартными отклонениями в серии результатов измерений или другой информации.

Предельная погрешность измерения в ряду измерений $3S$ – максимальная погрешность измерения. Во многих случаях погрешность $3S$ принимают за предельную, то есть $\Delta_{np} = \pm 3S$. При необходимости за предельную погрешность может быть принято и другое значение погрешности.

Суммарная средняя квадратическая погрешность результата измерений – погрешность результата измерений (состоящая из суммы случайных и не исключённых систематических погрешностей, принимаемых за случайные), вычисляемая по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S^2 + S_{\Theta}^2},$$

где $S_{\Theta} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_i \Theta_i^2}$ – средняя квадратическая погрешность суммы не исключённых систематических погрешностей Θ_i при равномерном распределении (принимаемых за случайные). Здесь за S принимается либо S_x , либо $S_{\bar{x}}$.

Доверительные границы суммарной погрешности $(\Delta x)_{\Sigma}$ могут быть вычислены по формуле

$$(\Delta x)_{\Sigma} = \pm t_{\Sigma} S_{\Sigma},$$

где $t_{\Sigma} = \frac{\Theta + t S_{\bar{x}}}{S_{\Theta} + S_{\bar{x}}}$; $\Theta = \sum \Theta_i$ – граница суммы не исключённых систематических погрешностей результата измерений, а $\pm t S_{\bar{x}}$ – доверительная граница погрешности результата измерений.

Правила записи результатов измерений

Результаты измерения могут быть представлены в цифровом, аналитическом и графическом виде.

1. Запись цифровых результатов измерений должна обязательно содержать значение самой величины и погрешности её измерения, *выраженные в одних и тех же единицах*².

Примеры: 1) диаметр прутка $D = (3,0 \pm 0,1)$ мм; 2) константа Больцмана $k = (1,38049 \pm 0,00005) \cdot 10^{-16}$ эрг·(К)⁻¹.

² Если погрешность записывается отдельно от результата, то она может быть выражена в процентах, долях и т. д.

Для случайной величины (например, интенсивности α -источника) помимо самого значения и статистической погрешности измерения результат в общем случае должен содержать ещё и доверительную вероятность p того, что истинное значение лежит в указанном диапазоне:

$$X = (396 \pm 6) \text{ частиц/с.}, \quad p = 0,95.$$

2. Число значащих цифр, приводимых в результате, зависит от точности измерений. Обычно точность измерений в учебной лаборатории не превышает единиц процентов, поэтому окончательный результат измерения в этом случае должен содержать **не более трех** значащих цифр (таблица 1).

Таблица 1

Запись результатов измерения g (м/с²) в зависимости от величины погрешности

Расчетный результат	Погрешность	Правильная запись
$9,8315 \pm 0,028165$	0,03	$9,83 \pm 0,03$
$9,8315 \pm 0,26365$	0,3	$9,8 \pm 0,3$
$9,8315 \pm 3,42816$	3,0	$10,0 \pm 3,0$

В промежуточных расчётах для измеряемых величин рекомендуется использовать на одну значащую цифру больше. Последняя значащая цифра округляется по обычным правилам. Если измеряемая величина известна с точностью до второго знака, то результат рекомендуется представлять в виде $3,2 \cdot 10^3$, а не 3200.

Правила определения погрешности прямых измерений

1. Если измеряемая величина X по своей природе не носит случайного характера и разброс значений её измерений существенно меньше погрешностей прибора, то погрешность результата ΔX берется равной погрешности прибора $\Delta X_{пр}$. (Естественно, предварительно необходимо убедиться в возможности пренебречь другими погрешностями). Относительная погрешность результата определяется как $\delta X = \Delta X/X$.

2. Если результаты многократных измерений величины X имеют разброс, превышающий приборные погрешности, то оценка действительного значения может определяться как *среднее арифметическое*:

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

где X_i – результаты однократных измерений величины X , полученные в эксперименте; $i = 1, 2 \dots n$ – номер в ряду измерений. Весь «набор» из n проведённых однократных измерений называется *выборкой* X_n .

3. Для определения *случайной погрешности* среднего поступают следующим образом.

Если число наблюдений n в выборке достаточно велико (что значит «велико», мы увидим ниже в п. 4), то величину случайной погрешности среднего значения X определяют по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}. \quad (2)$$

Вероятность p того, что истинное значение измеряемой величины находится внутри некоторого интервала от $\bar{X} - \Delta X$ до $\bar{X} + \Delta X$ называется *доверительной вероятностью* или *коэффициентом надёжности*, а сам интервал – *доверительным интервалом*.

Полученная из соотношения (2) погрешность называется *среднеквадратичной погрешностью среднего арифметического* значения и определена для доверительной вероятности $p = 0,68$.

В этом случае результат измерения записывается в виде:

$$X = \bar{X} \pm \Delta X = \bar{X} \pm S_{\bar{x}}. \quad (3)$$

Если число n невелико (например, меньше 20), то для определения погрешности результата используется поправочный коэффициент t_p (только для нормального распределения!), называемый *коэффициентом Стьюдента* (таблица 2).

В этом случае результат измерения записывается в виде

$$X = \bar{X} \pm t_p \cdot S_{\bar{x}}. \quad (4)$$

Если число измерений больше 20–30, то (для доверительной вероятности $p = 0,68$) учёт коэффициента Стьюдента не изменит оценки погрешности, поскольку она определяется с точностью 10 %.

Величина коэффициента Стьюдента зависит от числа наблюдений n в выборке и от доверительной вероятности, которую необходимо получить. Из таблицы 2 легко понять, что значит «велико» или «мало» число наблюдений в выборке. Если, например, нас удовлетворяет доверительная вероятность $p = 0,68$, то уже при числе измерений $n = 6$ ($n - 1 = 5$) коэффициент Стьюдента равен 1,11. Это означает, что поправка, вносимая коэффициентом t_p (*к погрешности измерения*, а не самой средней величине!) составляет не более 11 %.

Таблица 2

Коэффициенты Стьюдента t_p

n - 1	P			
	0,683	0,95	0,99	0,997
2	1,32	4,70	9,9	19,2
3	1,20	3,18	5,8	9,2
4	1,15	2,78	4,6	6,6
5	1,11	2,57	4,0	5,5
6	1,09	2,45	3,7	4,9
7	1,08	2,37	3,5	4,5
8	1,07	2,31	3,4	4,3
9	1,06	2,26	3,2	4,1
10	1,05	2,23	3,2	4,0
20	1,03	2,09	2,8	3,4
50	1,01	2,01	2,7	3,9
100	1,00	1,98	2,6	3,1
200	1,00	1,97	2,6	3,0

4. С увеличением числа измерений n в выборке величина среднеквадратической погрешности среднего $S_{\bar{x}}$ уменьшается. Если есть возможность увеличить серию повторных измерений, то можно решить обратную задачу – найти такое число измерений n , которое позволит сделать случайную погрешность среднего меньше систематической. Для этого можно воспользоваться данными таблицы 3.

Пример использования табл. 3. Пусть систематическая погрешность величины X известна и составляет ΔX . Если систематическая погрешность равна случайной, тогда можно задаться допустимой величиной случайной погрешности $S_{\bar{x}}$, взяв её равной, например, 10 % от систематической: $S_{\bar{x}} = 0,1\Delta X$. В общем случае $S_{\bar{x}} = \varepsilon \Delta X$, где ΔX – величина систематической погрешности, $S_{\bar{x}}$ – величина случайной погрешности, $\varepsilon = S_{\bar{x}} / \Delta X$ – доля случайной погрешности по отношению к систематической. Величина ε будет иметь значения $S_{\bar{x}} / \Delta X$ только в среднем. Число измерений n для данных p и ε находим по таблице 3.

Таблица 3

Число измерений n , гарантирующее выбранную долю случайной погрешности ε

$\varepsilon = S_{\bar{X}}/\Delta X$	p					
	0,5	0,7	0,9	0,95	0,99	0,999
1,0	$n = 2$	3	5	7	11	17
0,5	3	6	13	18	31	50
0,4	4	8	19	27	46	74
0,3	6	13	32	46	78	127
0,2	13	29	70	99	171	277
0,1	47	169	273	387	668	1089

Определение погрешности косвенных измерений

Пусть искомая величина N (результат косвенного измерения) является функцией других величин A, B, C (результатов прямых измерений): $N = f(A, B, C)$. Определение погрешности результата существенно зависит от характера погрешностей входящих в него величин: являются ли они только систематическими, только случайными или присутствуют и те и другие.

1. Если все погрешности прямых измерений известны (например, приборные), то максимальная оценка погрешности результата определяется по формуле

$$\Delta N = \sum_{i=1}^k \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right|, \quad (5)$$

где $N = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ – искомая величина, рассчитываемая по результатам измерения других величин x_i ; $\partial f / \partial x_i$ – частные производные функции f по соответствующему x_i ; Δx_i – абсолютная погрешность i -го измерения. Прямые скобки означают модуль произведения.

В таблице 4 представлены часто встречающиеся случаи функциональной зависимости косвенных результатов.

Таблица 4

Абсолютные и относительные погрешности искомой величины для некоторых видов функциональной зависимости

Вид функции	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$N = A + B + C$	$\Delta A + \Delta B + \Delta C$	$\frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C}{A + B + C}$
$N = A - B$	$\Delta A + \Delta B$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}$
$N = A \cdot B \cdot C$	$A \cdot B \cdot \Delta C + B \cdot C \cdot \Delta A + A \cdot C \cdot \Delta B$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}$
$N = A^n$	$nA^{n-1} \Delta A$	$n \frac{\Delta A}{A}$
$N = \sqrt[n]{A}$	$\frac{1}{n} \cdot A^{n-1} \cdot \Delta A$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta A}{A}$
$N = \frac{A}{B}$	$\frac{B \Delta A + A \Delta B}{B^2}$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
$N = \sin A$	$\Delta A \cdot \cos A$	$\Delta A \cdot \operatorname{ctg} A$
$N = \cos A$	$\Delta A \cdot \sin A$	$\Delta A \cdot \operatorname{tg} A$
$N = \operatorname{tg} A$	$\frac{\Delta A}{\cos^2 A}$	$\frac{\Delta A}{\sin A \cdot \cos A}$
$N = \operatorname{ctg} A$	$\frac{\Delta A}{\sin^2 A}$	$\frac{\Delta A}{\sin A \cdot \cos A}$

2. Если все погрешности величин A, B, C носят случайный (независимый) характер, то погрешность результата определяется по формуле

$$S_{\bar{x}_\Sigma} = \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{\partial N}{\partial x_i} S_{\bar{x}_i} \right)^2}, \quad (6)$$

где $S_{\bar{x}_\Sigma}$ – погрешность результата косвенного измерения; $S_{\bar{x}_i}$ – погрешность результата i -го прямого измерения, рассчитанная по формуле (2).

Графическое представление экспериментальных результатов

Правила построения графиков

Графическое представление экспериментальных материалов (графики, диаграммы, гистограммы, фотоматериалы, рисунки) используется для различных целей:

– наглядное изображение экспериментальных данных для качественного анализа поведения исследуемого объекта;

– определение (качественное, количественное) характерных точек и параметров процессов по наличию «особенностей»: максимумов, минимумов, точек перегиба, излома, скачка и т. п.;

– аппроксимация экспериментальных точек кривыми и определение по ним законов и закономерностей поведения объекта;

– проверка предполагаемых и обнаружение неизвестных зависимостей, выражаемых аналитическими функциями и т. д.

В зависимости от целей вид и способ графического представления может быть различным. Графики и диаграммы экспериментальных результатов, которые студенты представляют в отчётах по работам измерительного практикума, должны удовлетворять следующим требованиям:

– иметь оси координат с нанесёнными на них наименованиями и единицами измерения;

– содержать экспериментальные точки (если график строится по точкам, полученным в результате измерений); желательно указать масштаб погрешностей, характерных для различных участков графика (рис. 1).

Масштаб погрешностей изображается отрезками прямых, проведённых через экспериментальные точки параллельно осям координат, с длиной, равной погрешности в масштабе соответствующей оси координат;

– аппроксимирующие кривые, проведённые по экспериментальным точкам, не должны скрывать самих точек и их реального разброса.

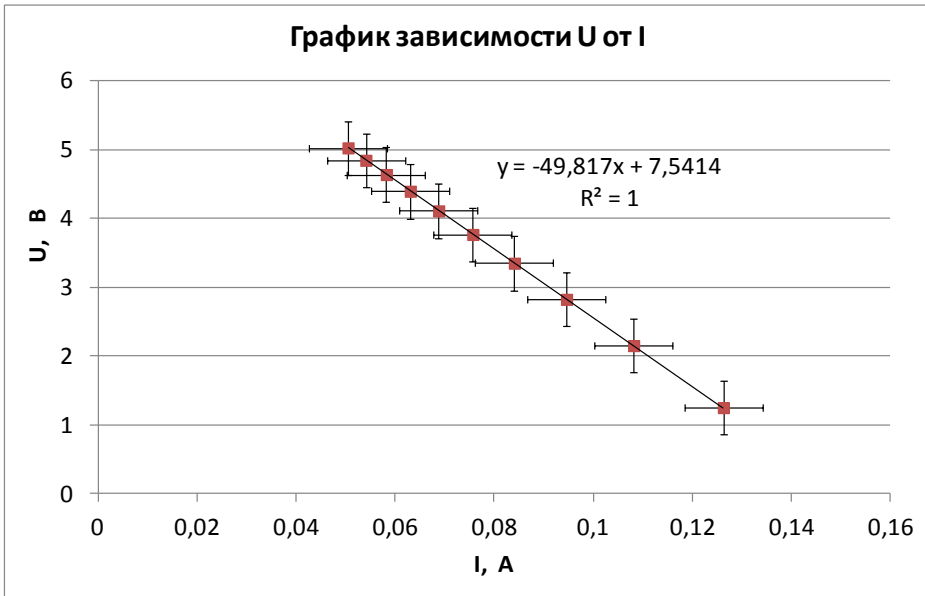


Рис. 1. График зависимости напряжения от тока

На рис. 2 приведён пример графика (экспериментальных точек и сглаживающей кривой), изображающего зависимость напряжения U_c на конденсаторе от времени t при его разряде через сопротивление R .

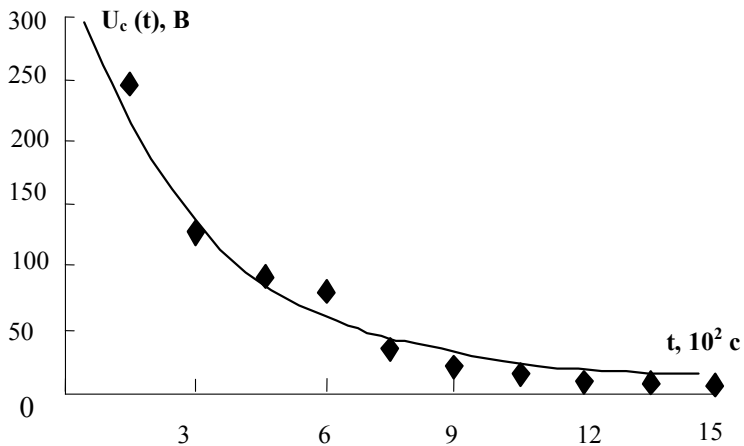


Рис. 2. График разряда конденсатора

Если целью графического представления является проверка предполагаемой аналитической зависимости экспериментальных данных, то очень

полезным приёмом оказывается *линеаризация* графика путём выбора нелинейного масштаба на соответствующей оси координат.

Например, предполагаемый закон разряда конденсатора на рис. 2 – это экспонента $U_c = U_0 \exp(-t / RC)$. Прологарифмируем это выражение и введём новые обозначения:

$$\ln U_c = \ln U_0 - \frac{1}{RC} t \rightarrow y = a - bt.$$

Если на оси ординат откладывать напряжение U_c в логарифмическом масштабе ($y = \ln U_c$), то предполагаемая зависимость будет отображаться прямой линией, угловой коэффициент которой равен $(-1/RC)$ (рис. 3).

Линеаризация значительно упрощает проверку типа зависимости.

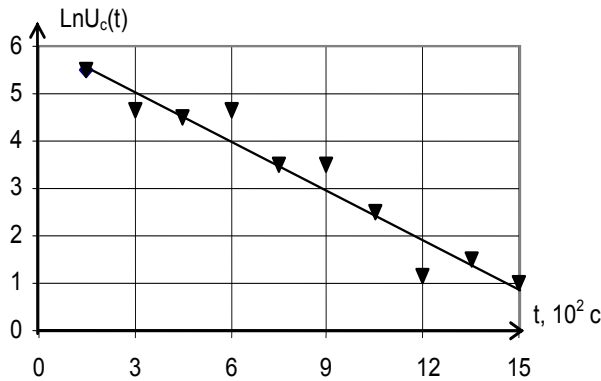


Рис. 3. Линеаризованный график разряда конденсатора

Сравнивая рисунки 2 и 3, легко увидеть, что экспериментальные точки хорошо укладываются на прямую линию. В то же время по первому рисунку трудно определить, принадлежат они экспоненциальной зависимости или какой-либо степенной функции.

Метод наименьших квадратов

Пусть ожидаемая зависимость экспериментально определяемой величины $Y = f(X)$ имеет вид прямой

$$Y = a + bX \quad (7)$$

(в частности, это может быть линеаризованная зависимость). Экспериментальные точки $Y_k, X_k, k = 1, 2, \dots, n$, как правило, не лежат на одной прямой, а «разбросаны» в некоторой полосе значений. Возникает задача провести через такие точки оптимальную прямую и определить погрешность её параметров. Эту задачу можно решить при помощи *метода наименьших квадратов*.

Провести прямую, удовлетворяющую уравнению (7), означает найти параметры a и b по заданным (экспериментально определенным) параметрам точек Y_k, X_k .

Возьмем случай, когда погрешность измерения аргумента ΔX много меньше, чем для самой функции ΔY . В этом случае наилучшая прямая должна удовлетворять следующим условиям:

1. прямая должна проходить через «центр тяжести» экспериментальных точек, определяемый как точка с координатами

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k; \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k; \quad (8)$$

2. сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от прямой должна быть минимальной:

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Y_k - bX_k - a)^2 = \min. \quad (9)$$

В теории доказывается, что этим условиям удовлетворяет прямая со следующими параметрами:

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}; \quad b = \frac{\overline{XY} - \bar{X} \cdot \bar{Y}}{(X^2) - (\bar{X})^2}, \quad (10)$$

где

$$\overline{XY} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k Y_k; \quad \overline{X^2} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k^2. \quad (11)$$

Погрешности параметров прямой (S_y, S_a, S_b) определяются следующими выражениями:

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (Y_k - bX_k - a)^2};$$

$$S_a = \sqrt{\frac{\overline{X^2}}{(X^2) - (\bar{X})^2}}; \quad S_b = \sqrt{\frac{1}{(X^2) - (\bar{X})^2}}, \quad (12)$$

где S_y – погрешность функции Y , S_a и S_b – погрешности определения коэффициентов a и b соответственно.

Основные принципы измерений

Проведение любого эксперимента сводится к выполнению последовательности измерений и получению численных значений измеряемых величин. Измерение – это процесс получения информации в форме результатов измерений, отражающих характеристику объекта измерения. Измерение должно быть:

– избирательным, то есть должно давать информацию только об измеряемой величине,

– объективным – не зависеть от наблюдателя. Для гарантии объективности измерения необходимо пользоваться приборами. Прибор должен преобразовать изучаемое явление к такому виду, в котором оно будет доступно любому наблюдателю, например, как число на цифровом дисплее.

Различают качественные и количественные измерения. Качественные измерения производят тогда, когда ещё неизвестны определяющие характеристики измеряемого объекта. Качественное измерение обеспечивает информацией, необходимой для того, чтобы выбрать приборы для проведения количественных измерений.

Измерение физических величин

Измерение физических величин – это получение информации о физических состояниях или явлениях, осуществляемое с помощью технических средств. Используемые в физике экспериментальные методы и измерительная техника весьма многообразны. Следует отметить, что специальные методы измерений имеются не только в физике, но и в других разделах естественных и технических наук.

На рис. 4 приведена структурная/обобщенная схема измерения, состоящая из объекта измерения, измерительной системы и регистратора, находящихся в определённой окружающей среде.

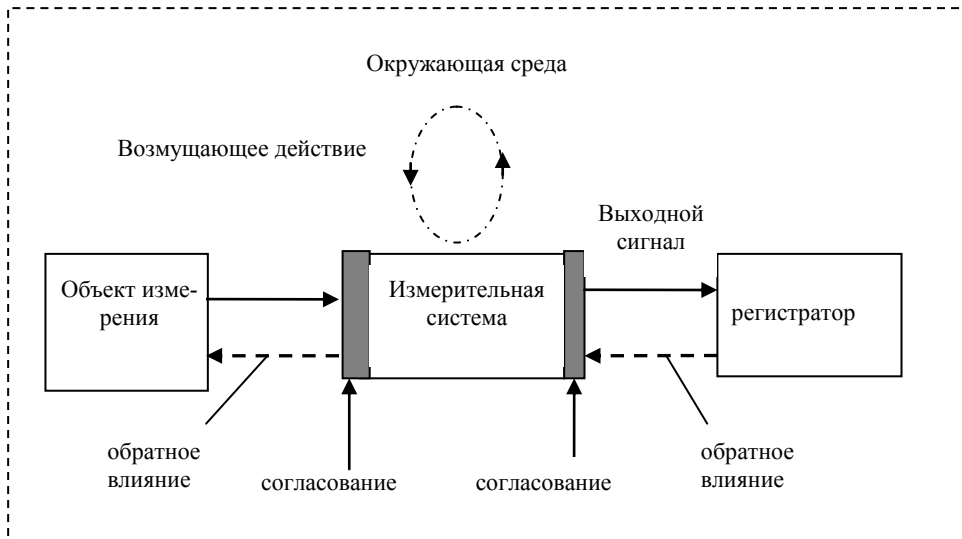


Рис. 4. Структурная схема измерений

Сплошными стрелочками на рисунке показана передача измерительной информации от объекта измерения в измерительную систему и далее к регистратору, которым может быть или измерительный прибор или человек-наблюдатель.

Штриховыми стрелочками показано обратное влияние на объект измерения, которое может быть значительным, что приведёт к заметному изменению измеряемой величины. Чтобы свести это влияние к минимуму, необходимо согласовать входной каскад измерительной системы с объектом измерения.

Аналогичную процедуру согласования необходимо провести между регистратором и выходом измерительной системы.

Кроме того, на измерительную систему оказывает действие окружающая среда, которая может вызывать в ней возмущения и помехи, например, за счёт влияния температуры, внешних электрических и магнитных полей и т. д.

Источником погрешностей измерения является также несовершенство самой измерительной системы, которое приводит к неправильным измерениям.

Измерительная система

Структура измерительных систем

Измерительной системой может быть *одиночный прибор* или *совокупность измерительных приборов и устройств*, необходимых для проведения измерения (рис. 5). Измерительные системы могут состоять из разных подсистем и иметь особенный порядок их расположения.

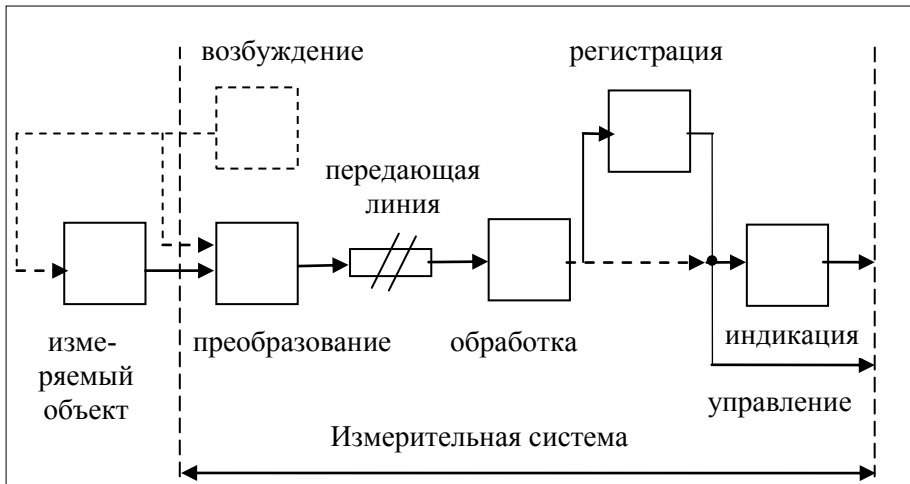


Рис. 5. Примерная структура измерительной системы

Информация, получаемая в результате измерения, может содержаться в объекте в пассивной или активной форме. *Информация является активной*, если она имеет форму энергетической характеристики изучаемого явления (электрические, оптические и акустические сигналы). Регистрация пассивной информации техническими средствами возможна только после преобразования её в активную форму.

Подсистемы, из которых состоит измерительная система

Преобразователь. Первым звеном в измерительной системе является преобразователь, который преобразует измеряемую величину в сигнал для последующей передачи, обработки или регистрации. Обязательное условие *измерительного* преобразования – сохранение в выходной величине преобразователя информации о количественном значении измеряемой величины с *установленной точностью*.

Имеются два основных вида преобразователей: активный и пассивный. **Активный преобразователь** непосредственно преобразует одну форму энергии в другую, не нуждаясь во внешнем источнике энергии

(возбуждении). Примером активного преобразователя является, например, термопара, которая сразу преобразует тепловую энергию в электрическую. **Пассивный преобразователь** не может непосредственно преобразовать измеряемую характеристику объекта в электрическую величину. Для преобразования ему необходим дополнительный источник энергии. Примером пассивного преобразователя является, например, термометр сопротивления (терморезистор). Сопротивление терморезистора зависит от температуры. Для перевода величины сопротивления в электрическую величину требуется дополнительный источник энергии.

Передающая линия предназначена для передачи сигнала от источника к регистратору с минимальными потерями, без искажений формы сигнала и с защитой от посторонних помех. Линии передачи могут состоять из *параллельных проводников, витой пары и коаксиальных кабелей (оптоволоконный кабель)*.

Двухпроводная линия используется в *низкочастотных цепях и цепях постоянного напряжения*, когда поток передаваемой от источника энергии определяется в основном свойствами нагрузки и слабо зависит от параметров передающей линии.

Витая пара – это два изолированных проводника скрученных друг вокруг друга. Основной характеристикой качества витой пары является сбалансированность, так как электромагнитные поля (помехи), возникающие при протекании тока по проводникам, находятся в противофазе, поэтому суммарное излучение или восприимчивость к помехам «идеальной пары» стремится к нулю.

В *коаксиальном кабеле* влияние помех ослаблено за счет экранирования внутренней центральной жилы внешним цилиндрическим проводником (рис. 6).

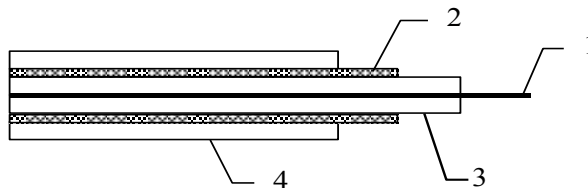


Рис. 6. Коаксиальный кабель

1 – центральный провод, 2 – экран, 3 – диэлектрик,
4 – защитный изоляционный слой

При передаче *высокочастотных* сигналов и коротких импульсов большое значение имеет *волновое сопротивление* передающей линии. Если волновое сопротивление линии не равно сопротивлению нагрузки, то возникает отраженная электромагнитная волна, что может приводить к искажению сигнала. При равенстве этих сопротивлений происходит со-

гласование передающей линии с приёмным устройством, и передаваемый сигнал поступает в приёмное устройство без искажений.

Для линии без потерь волновое сопротивление (характеристический импеданс Z) определяется по формуле:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где L – погонная индуктивность, которой обладают образующие линию проводники, а C – погонная ёмкость между ними.

Волновые сопротивления некоторых соединительных линий

Тип линии	Сопротивление, Ом
Коаксиальный кабель	50, 75, 100
Витая пара	100–120
Свободное пространство	377

Примечание. Характеристический импеданс свободного пространства (воздуха) рассчитывается так же, как импеданс вакуума, по формуле $Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, где μ_0 , ϵ_0 – соответствующие магнитная и электрическая постоянные. Для влажного воздуха импеданс изменится.

Обработка. Иногда электрический сигнал на выходе преобразователя/датчика имеет такой вид, в котором он не может быть представлен наблюдателю. Тогда необходимо провести соответствующую обработку/преобразование, например, линейные преобразования: фильтрацию, усиление/ослабление, оцифровку АЦП, выпрямление.

Регистрация результата измерения производится для того, чтобы сохранить в памяти экспериментальные данные, которыми затем можно воспользоваться в любое время. Сохранение результатов измерений можно производить также с использованием графической записи.

Устройство индикации предназначено для представления результатов измерения человеку-наблюдателю. Устройство индикации может быть аналоговым (электронный луч осциллографа) или цифровым (аналого-цифровой дисплей или светящиеся элементы индикации). Если устройства индикации рассчитаны на визуальное наблюдение, то они являются электрооптическими преобразователями.

Управление, обратная связь. Существуют измерительные системы, в которых результат не регистрируется и не воспроизводится способом индикации, а используется для управления процессом. Целью управления процессом является такое регулирование, при котором выходной сигнал соответствует определенным требованиям (например, *процесс управления с обратной связью*).

Характеристики измерительной системы

Основными характеристиками электроизмерительных систем или приборов являются уравнение преобразования, чувствительность, порог чувствительности, диапазон измерений, область рабочих частот, класс точности, потребляемая мощность, быстродействие, входное сопротивление.

Уравнение преобразования $Y = f(X)$ – зависимость между входной X и выходной Y величиной. Вид уравнения преобразования определяется конструктивными параметрами прибора.

Чувствительность измерительной системы/прибора определяется из уравнения преобразования и равна отношению изменения сигнала ΔY на выходе прибора к его изменению ΔX на входе:

$$S = \Delta Y / \Delta X.$$

Если передаточное соотношение $Y = f(X)$ – линейное, то чувствительность постоянная и определяется по формуле $S = Y/X$.

Обратная чувствительности величина $\alpha = 1/S$ является *ценой деления*. Чувствительность измерительной системы зависит от частоты $S = f(\omega)$.

Для цифровых приборов величиной ΔY является единица младшего разряда (шаг квантования).

Порог чувствительности – наименьшее значение входной величины, которое можно обнаружить с помощью данного прибора с заданной точностью.

Разрешающая способность \mathfrak{R} – это наименьший интервал Δx значения измеряемой величины x , который всё ещё вызывает изменение результата измерения, то есть $\mathfrak{R} = \frac{x}{\Delta x}$. Для всех измерительных систем разрешающая способность имеет конечное значение.

Диапазон измерений (u_{\max}, u_{\min}) – область значений измеряемой величины, для которой показания прибора соответствуют его классу точности. Диапазон измерений может состоять из нескольких поддиапазонов.

Область рабочих частот – полоса частот, в пределах которой погрешность измерительной системы, вызванная изменением частоты, соответствует паспортному значению.

Класс точности γ – отношение абсолютной погрешности ΔX к предельному значению шкалы прибора X_{\max} :

$$\gamma = \pm \frac{\Delta X}{X_{\max}} 100 \%$$

Следует отличать класс точности прибора от его относительной погрешности, определяемой по формуле

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta X}{X} 100 \%,$$

где X – численное значение измеряемой величины.

Поясним сказанное на примере. Пусть напряжение 30 В измерено вольтметром класса точности $\gamma = 0,5$ с пределом по шкале $U_{\text{пр}} = 300$ В. Это означает, что абсолютная погрешность прибора

$$\Delta U = \frac{\gamma U_{\max}}{100} = \pm \frac{0,5 \cdot 300}{100} = \pm 1,5 \text{ В.}$$

Следовательно, относительная погрешность нашего измерения

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 \cdot \% = \pm \frac{1,5}{30} \cdot 100 \% = \pm 5 \%,$$

а не 0,5 %, как если бы величина измеряемого напряжения была равна 300 В.

Из данного примера видно, что для проведения измерения с высокой точностью следует подобрать такой прибор (или предел многопредельного прибора), чтобы измеряемая величина составляла 70–90 % предельного значения шкалы, если измеряется постоянное напряжение/ток. При измерении переменного напряжения стрелочными вольтметрами (для RMS вольтметров) измеряемая величина не должна превышать 70 % предельного значения шкалы.

Основные параметры измерительного прибора указаны на его шкале или приводятся в паспортных данных.

Аннотированное представление работ

В работах 2, 3, 8, М1, М2, М3 измерительного практикума производится непосредственное измерение различных параметров электрических сигналов электрическими приборами. В работах 5, 6, 7, 9, 10, М4, М5, М6, М7 электрическими приборами измеряются неэлектрические величины, которые преобразованы в электрические специальными преобразователями. Далее приведём краткую аннотацию работ измерительного практикума.

Работы 1.1–1.2

Измерение случайных величин

Работа 1.1

Измерение стационарных случайных величин и статистическая обработка результатов



При выполнении данной работы студенты знакомятся со статистическими методами обработки и представления результатов измерений на примере изучения процесса излучения α -частиц при радиоактивном распаде ядер (^{239}Pu) с периодом полураспада 24360 лет и энергией α -частиц, равной примерно 5 МэВ. Так как распад является спонтанным,

то количество α -частиц, испускаемых источником за фиксированный промежуток времени, является случайной величиной. Поэтому результаты повторных измерений такой величины могут значительно различаться, то есть будет наблюдаться «разброс» экспериментальных данных. Причём любое из полученных значений будет правильным в том смысле, что не будет являться экспериментальной погрешностью: просто на момент одного измерения исследуемая величина имела одно значение, а на момент другого измерения – другое. Поэтому для получения правильного результата необходимо научиться использовать статистическую обработку результатов измерений случайных величин.

Цель работы: изучение способа измерения стационарной случайной величины, метода обработки и представления результатов измерений на примере исследования интенсивности излучения α -частиц при радиоактивном распаде ядер (^{239}Pu).

Исследование процесса распада производится на установке, укомплектованной современными приборами, позволяющими максимально автоматизировать как процесс измерений, так и статистическую обработку экспериментальных данных.

Работа 1.2

Определение энергии образования ион-электронной пары α -частицами в воздухе



Образование ион-электронной пары. α -частицы, образующиеся в результате радиоактивного распада ядер ^{239}Pu , имеют кинетическую энергию E_α , примерно равную 5 МэВ. α -частицы тормозятся в воздухе и теряют свою энергию, которая тратится в основном на возбуждение, диссоциацию и ионизацию молекул воздуха. При ионизации образуется электрон-ионная пара: свободный электрон и положительно заряженный ион. Энергия, необходимая для освобождения электрона из молекулы, называется энергией ионизации и обычно измеряется в электрон-вольтах (эВ).

Цель работы: определение средней энергии, затраченной на образование электрон-ионной пары при торможении α -частиц в воздухе.

Для регистрации электрон-ионных пар используется ионизационная камера, состоящая из двух плоских электродов, к которым подаётся напряжение от источника питания постоянного тока. Камера установлена в экранирующем кожухе, предохраняющем измерительную систему от электромагнитных помех.

Работы 2.1–2.3

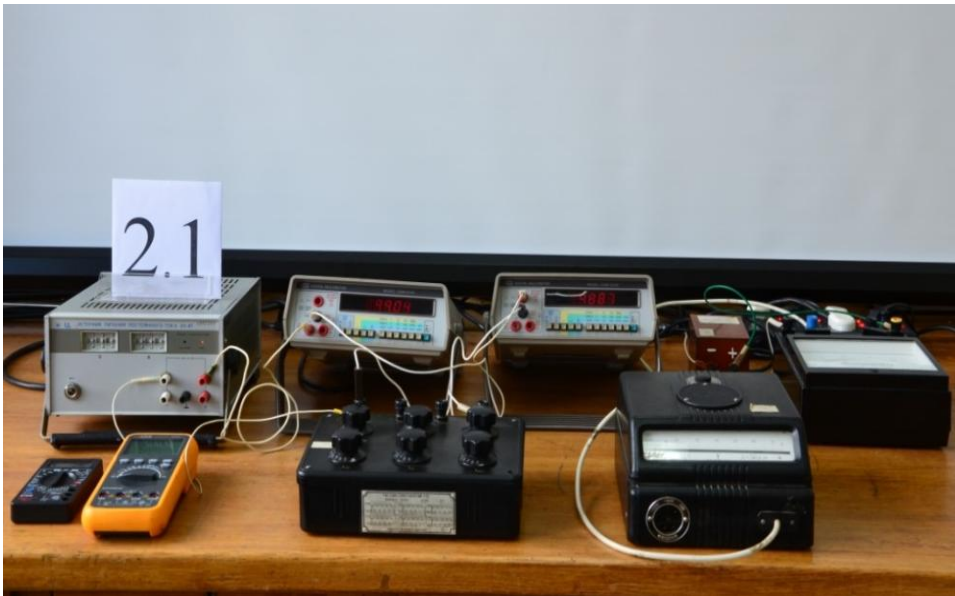
Основы измерений в электрических цепях

Описание работ 2.1, 2.2 состоит из общего теоретического введения и двух лабораторных работ.

В общей части рассмотрены основы измерения тока и напряжения в цепях постоянного и переменного тока, принцип действия магнитоэлектрических и электромагнитных аналоговых приборов, электростатического вольтметра и цифровых измерительных приборов (мультиметров).

Работа 2.1

Электроизмерительные приборы и источники питания постоянного тока



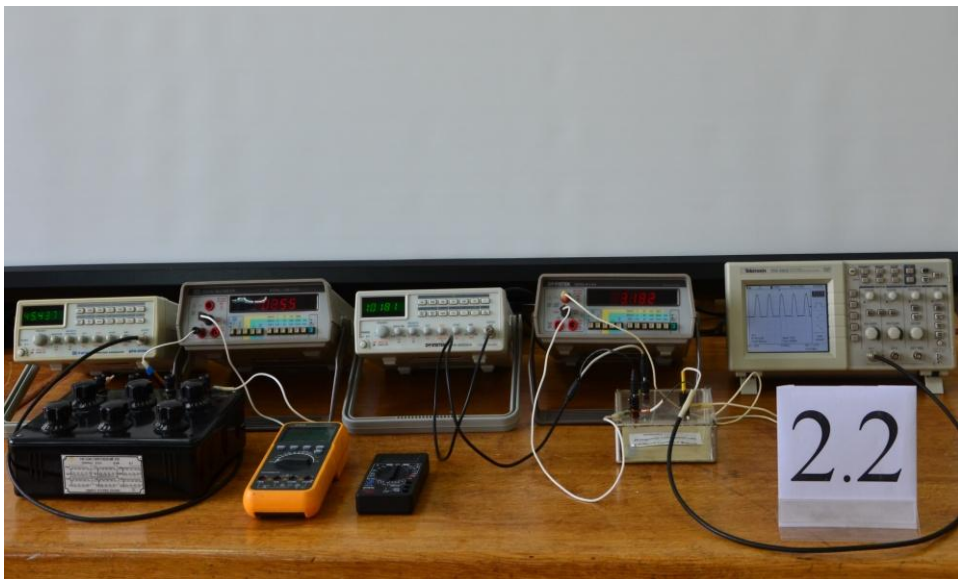
В данной работе студенты знакомятся с особенностями практического использования различных (аналоговых/электромеханических и цифровых) измерительных приборов при измерении тока, напряжения и сопротивления в цепях постоянного тока. Определяют внутреннее сопротивление приборов, изучают влияние измерительного прибора на объект измерения, режимы работы источников питания постоянного тока и их параметры, а также роль резисторов в электрических цепях (делитель, шунт, добавочное сопротивление).

Электрические измерения в цепях постоянного и переменного тока существенно различаются как по используемым приборам, так и по методам измерения. В цепях переменного тока измеряемые величины могут зависеть от того, какие значения переменных электрических величин (мгновенные, действующие, максимальные, средние) измеряются.

Работа 2.2

Основы измерений в цепях переменного тока

В работе 2.2 студенты изучают основы измерений в цепях переменного тока, используя цифровые измерительные приборы (мультиметры), осциллографы и источники периодических сигналов различной формы, а также знакомятся с понятием согласования в электрических цепях.



Цель работы: познакомиться с принципом действия цифровых измерительных приборов, научиться проводить измерения в цепях переменного тока, определить рабочий диапазон по частоте различных цифровых мультиметров, провести измерения величины напряжения периодических сигналов сложной формы и определить режимы работы источника гармонических сигналов.

Работа 2.3

Автоматизированные измерения лабораторным комплексом NI ELVIS

В данной работе студенты знакомятся с технологией виртуальных приборов на примере автоматизированного измерительного комплекса **NI ELVIS**. Проводят измерение характеристик различных элементов электрических цепей и электрических сигналов.

Для выполнения измерений в работе используется программный комплекс, разработанный фирмой **NI** на основе пакета графического программирования **LabVIEW**.



Цель работы: ознакомление с технологией виртуальных приборов на примере автоматизированного измерительного комплекса **NI ELVIS**. Измерение характеристик элементов электрических цепей (сопротивления, ёмкости, индуктивности, полного сопротивления), постоянного напряжения и тока, вольтамперной характеристики двухполюсников, определение проводимости диода, АЧХ и ФЧХ для ФВЧ и ФНЧ, а также использование мультиметра совместно с осциллографом **NI ELVIS** и использование генератора функций совместно с осциллографом **NI ELVIS**.

Работы 3.1–3.2

Изучение работы осциллографа

Осциллограф – это прибор для наблюдения формы сигналов и измерения их амплитудных, фазовых и временных характеристик. Кроме этого, современные *цифровые запоминающие* осциллографы позволяют преобразовывать аналоговые сигналы в цифровую форму, запоминать их в виде файлов, производить над ними некоторые математические операции, а также передавать файлы через интерфейс в другие устройства (например, на компьютер) для последующего хранения и обработки.

Исследуемые с помощью осциллографа величины могут быть любой природы – ток, магнитное поле, давление, температура, освещенность, перемещение, время и т. д., но для наблюдения с помощью осциллографа они должны быть предварительно преобразованы в электрическое *напряжение* (сигнал).

Визуальное наблюдение сигнала производится на экране, который представляет собой либо экран электронно-лучевой трубки (электронно-лучевые осциллографы), либо жидкокристаллический дисплей (цифровые запоминающие осциллографы).

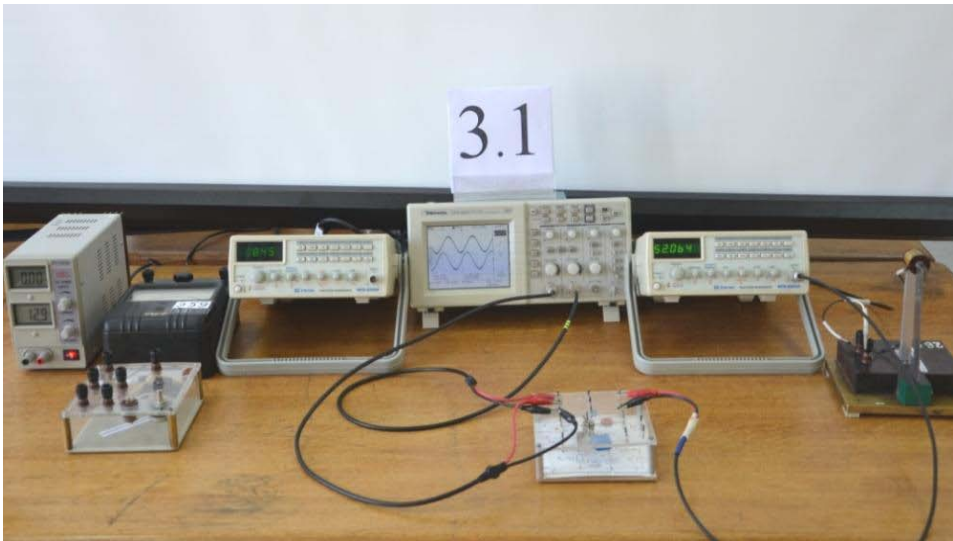
Принцип действия и схемотехника *электронно-лучевых* и *цифровых запоминающих* осциллографов различны, но основное назначение – наблюдение формы сигналов и измерение их характеристик – одинаково. Поэтому основные функциональные узлы и органы управления должны быть схожими, что позволяет описать их на одном «языке».

Чтобы научиться работать с осциллографом, необходимо:

- 1) освоить «функциональный язык»;
- 2) уметь найти на управляющей панели осциллографа нужные функциональные узлы (органы управления);
- 3) уметь установить их в соответствующий режим работы.

Работа 3.1

Измерения с помощью цифрового запоминающего осциллографа



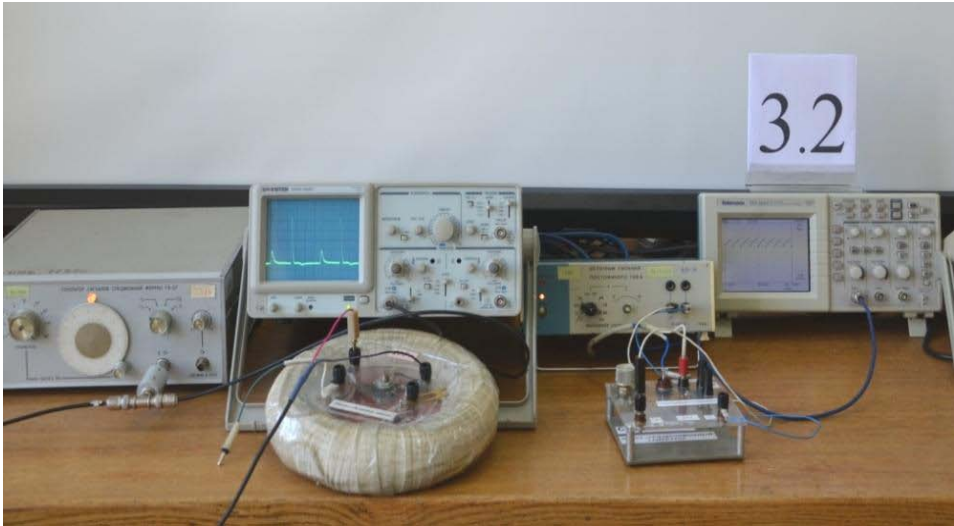
Цель работы: понять принцип действия цифрового запоминающего осциллографа и научиться использовать «Открытый и закрытый вход» для наблюдения и измерения параметров электрических сигналов в режимах: «Автоустановка», «Одиночный запуск» и «XY».

Для получения численных значений напряжения или времени научиться применять «Курсорные измерения», грамотно использовать вкладку «Измерения» в правой части экрана.

При освоении цифрового запоминающего осциллографа выполняются как двухканальные, так и одноканальные измерения, в которых определяются параметры затухающих колебаний механической системы, амплитудные и временные характеристики, нагревание нити накала лампочки, влияние частотной характеристики осциллографа на форму прямоугольного импульса, а также перенос данных с осциллографа на компьютер.

Работа 3.2

Измерения с помощью электронно-лучевого осциллографа



Цель работы: понять принцип действия электронно-лучевых осциллографов и научиться использовать их для наблюдения и измерения параметров различных электрических сигналов. Использовать режимы сложения и вычитания сигналов, поступивших на входы двухканального осциллографа, режим экрана XY, открытый и закрытый вход и режим внешнего запуска развёртки.

При изучении работы релаксационного генератора осциллограф используется для определения характеристик сигнала с переменной и постоянной составляющей в режимах открытого и закрытого входа. Измеряется период колебаний релаксационного генератора на неоновой лампочке и величина напряжения зажигания и гашения.

Изучение процесса распространения импульсного сигнала в длинной линии (коаксиальном кабеле), позволяет определить время его распространения и оценить величину волнового сопротивления кабеля.

Работы 4.1–4.2

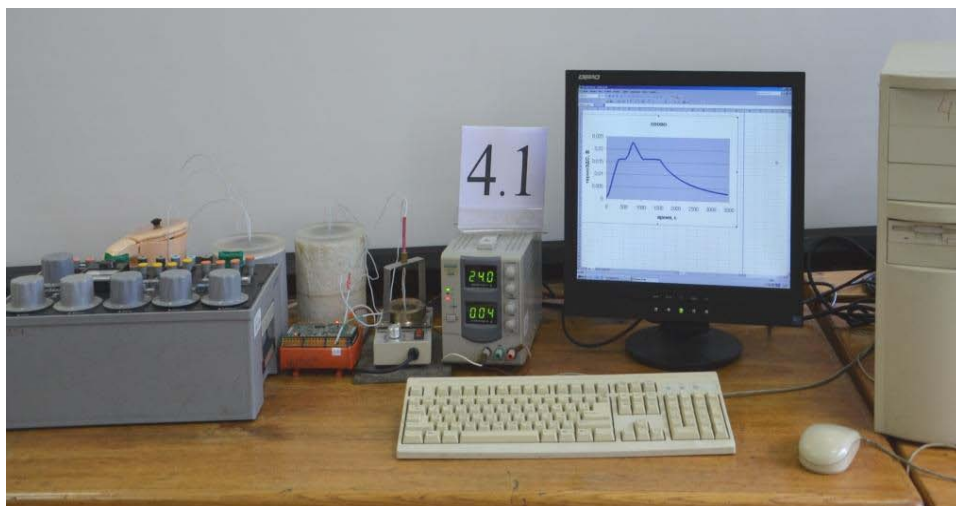
Компенсационные методы измерений

Существует класс электроизмерительных приборов, принцип действия которых основан на сравнении измеряемой (неизвестной) величины с известной, образцовой. В качестве элемента сравнения в таких приборах используются, как правило, рабочие эталоны единиц соответствующих величин: эталон напряжения, эталон сопротивления, эталон индуктивности и другие. Этим обеспечивается высокая точность и надежность измерений. Представителями данного класса приборов являются мосты и потенциометры.

Работа 4.1

Измерение напряжений потенциометром

Потенциометры предназначены для измерения электродвижущих сил (ЭДС) и напряжений методом компенсации неизвестного измеряемого напряжения известным эталонным, подключаемым в измерительную цепь. В качестве эталона напряжения используется элемент Вестона. Потенциометры бывают одноконтурные и многоконтурные. В данной работе используется двухконтурный потенциометр, который состоит из двух одноконтурных потенциометров, смонтированных в одном корпусе, поэтому при подготовке потенциометра к работе необходимо установить два рабочих тока.



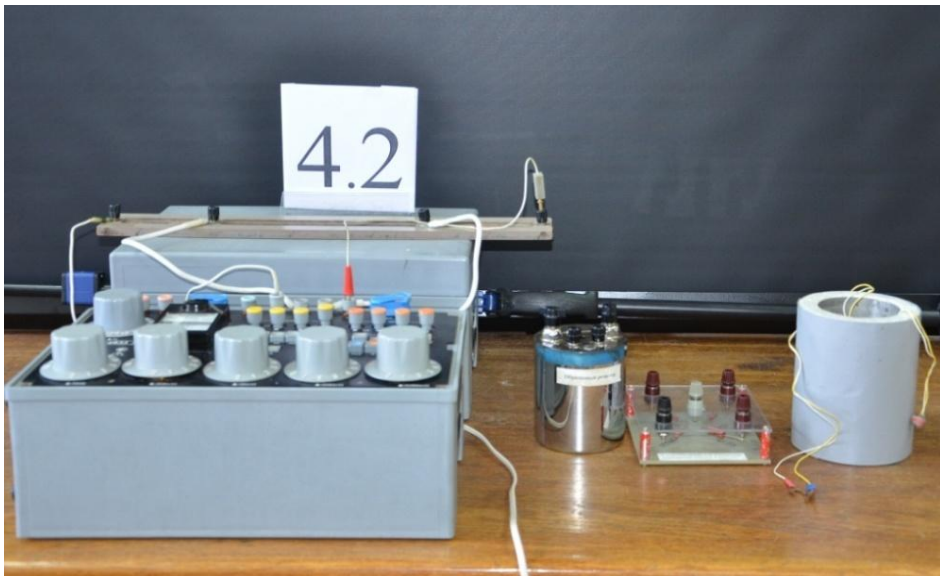
Цель работы: изучение компенсационных методов измерения ЭДС и

напряжений, регистрация зависимости ЭДС термопары при нагревании/плавлении и охлаждении/кристаллизации олова с использованием автоматизированной системы, определение чувствительности термопары и измерение температуры различных объектов.

Работа 4.2

Мостовые методы измерения сопротивлений

Мостами называются приборы, предназначенные для измерения сопротивлений методом сравнения. Для измерения сопротивлений более 50 Ом применяют одинарный мост – мост Уитстона. При измерении малых сопротивлений применяют двойной мост – мост Томпсона.



Цель работы: изучение мостовых методов измерения сопротивлений. С использованием *одинарного моста* измеряются величины нескольких стандартных сопротивлений и сопротивление терморезистора при разных температурах.

При измерении стандартных сопротивлений малой величины и зависимости сопротивления медного провода от длины используется *двойной мост*. Затем измеряется длина, диаметр провода и рассчитывается удельное сопротивление меди.

Работы 5.1–5.2

Измерение скорости звука в воздухе

В физике звуком называется распространение в упругой среде (газообразной, жидкой или твердой) слабых возмущений в виде механических колебаний малой амплитуды. Это волновой процесс, который характеризуется амплитудой A , частотой f , длиной волны λ и скоростью распространения C ($C = \lambda f$).

*Работа 5.1***Измерение скорости звука в воздухе
методом бегущей волны****Бегущая волна**

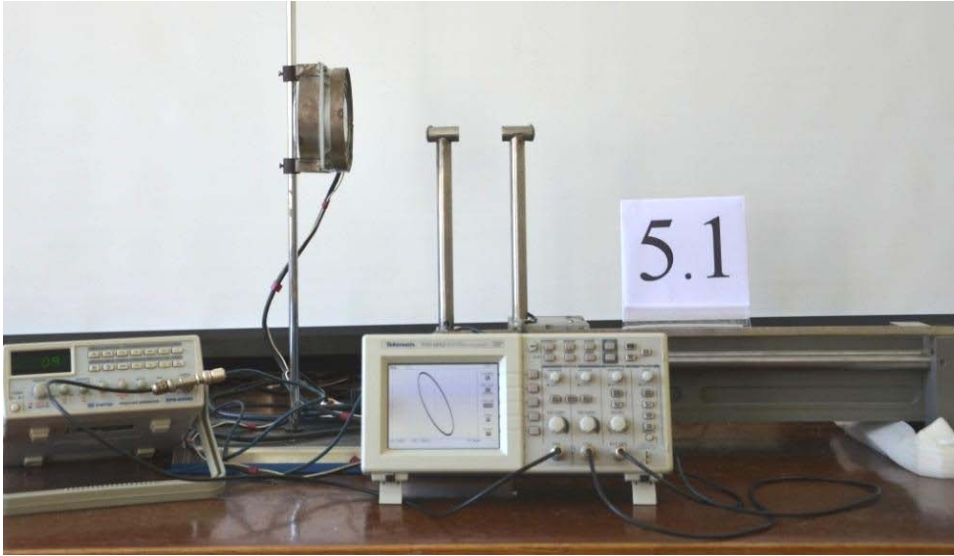
Если поверхность источника звука совершает гармонические колебания с частотой ω , то в упругую среду излучается *бегущая* звуковая волна этой же частоты. Для *плоской бесконечной* мембраны в однородной и изотропной среде вдоль направления, перпендикулярного плоскости мембраны (например, вдоль оси x), будет распространяться плоская монохроматическая волна:

$$A(x, t) = A_0 \cos(\omega t - kx) = A_0 \cos 2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right),$$

где A_0 – начальная амплитуда; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; f – линейная частота; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны. Для точечного источника звука волна будет сферическая, для неё зависимость амплитуды A от расстояния до приёмника r и времени t обычно записывается в виде:

$$A(r, t) = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - kr). \text{ В реальности размер источника всегда конечный,}$$

поэтому необходимо экспериментально определять его волновое поле. Принято считать, что волновое поле от источника конечного размера может быть ближним и дальним. Обычно ближнее поле ограничено расстоянием в несколько длин волн. Дальнее поле тоже конечного размера и ограничивается возможностью измерить его характеристики с необходимой точностью. По крайней мере, можно считать, что если размер источника мал по сравнению с длиной волны или он находится далеко от приёмника, то на расстояниях много больше длины волны форма волнового фронта в некотором определённом направлении будет близка к сферической.



Цель работы: знакомство с установкой для определения скорости звука в воздухе методом бегущей волны, измерение зависимости амплитуды волны от расстояния до приёмника, определение скорости звука в воздухе, сравнение её с табличным значением с учётом температуры помещения и измерение скорости потока воздуха.

Работа 5.2

Измерение скорости звука в воздухе методом стоячей волны

Суперпозиция бегущих волн (стоячие волны)

Если звуковая волна падает на границу раздела двух сред, имеющих различное акустическое сопротивление, равное произведению ρC , (здесь ρ – плотность среды, а C – скорость звука в среде), то она частично отражается, а частично проходит во вторую среду. Амплитуда отражённой и прошедшей волны зависит от акустических сопротивлений сред. Поскольку плотность металлов на 3–4 порядка больше, то на границе металл-воздух происходит практически полное отражение звуковых волн.

Мембрана, совершающая гармонические колебания, возбуждает в трубе бегущую волну, которую для простоты выразим как

$$A(x, t) = A_0 \cos(\omega t - kx).$$

Если пренебречь поглощением звука средой, то амплитуда волны не будет зависеть от координаты x . На границе с поршнем появится отражённая волна, выражение для которой будет иметь вид

$$A_{omp}(x, t) = A_1 \cos(\omega t - 2kL + kx).$$

Здесь в $2kL$ учитывается фаза падающей волны. При определённых условиях суперпозиция падающих и отражённых волн может создать практически стационарную систему стоячих звуковых волн внутри трубы.



Цель работы: знакомство с установкой, получение режимов стоячих волн в закрытой трубе и определение их пространственных характеристик.

Для определения скорости звука в воздухе по методу стоячей волны предлагается выбрать оптимальный способ при использовании следующих трёх вариантов.

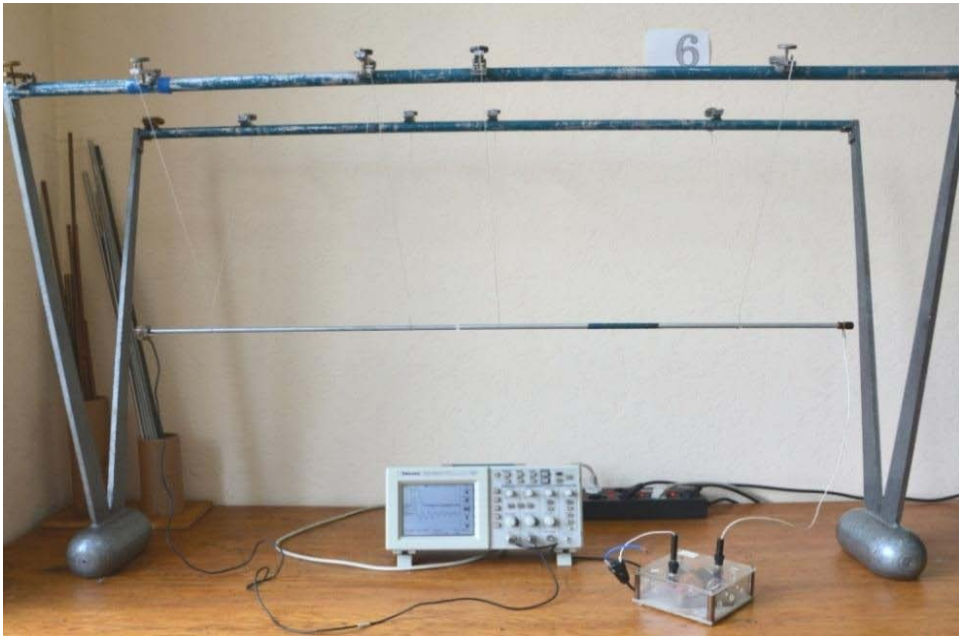
- Способ перемещения приёмника звука.
- Способ перемещения поршня.
- Способ подбора/изменения частоты.

В отчёте необходимо привести обоснование выбора оптимального способа проведения измерения.

Работа 6

Измерение скорости звука в твердых средах методом соударения стержней

Скорость звука в металлических стержнях определяется как скорость распространения слабого возмущения вдоль стержней. В твёрдых телах могут возбуждаться как поперечные, так и продольные волны. Волна называется продольной, если колебания частиц среды происходят в направлении распространения волны, и поперечной, если они происходят перпендикулярно распространению волны.



Используемая в данной работе установка позволяет измерять скорость распространения звука в стержнях двумя способами: через время соударения стержней и через время распространения звука по стержню.

Цель работы. Определение скорости звука в различных металлах методом соударения стержней.

Эксперименты проводятся:

- а) в стержнях одного металла (например, стальных) различной длины,
- б) в различных металлических стержнях (медь, латунь, алюминий) одинаковой длины.

Работа 7

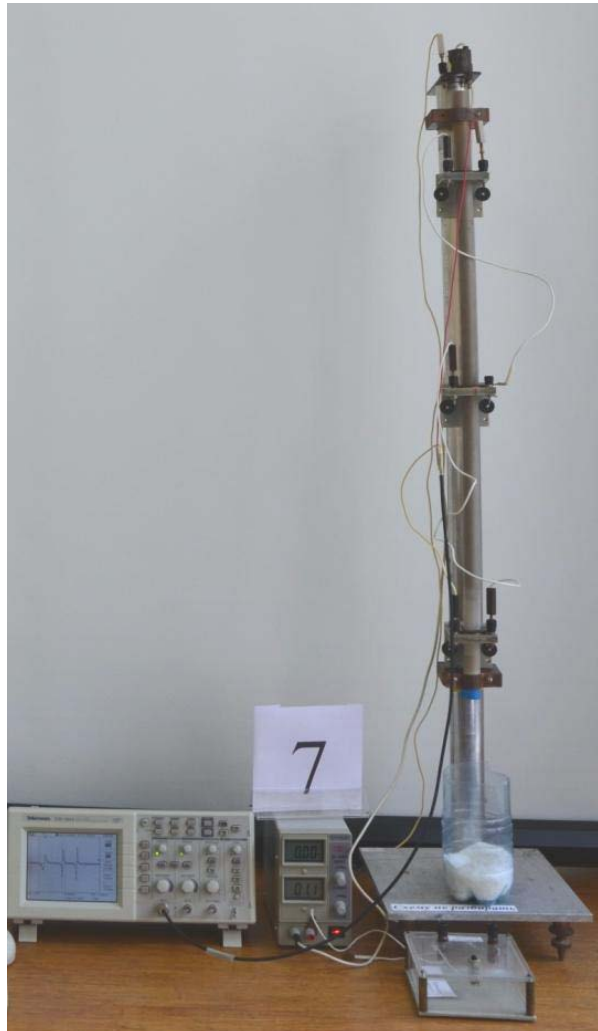
Измерение ускорения свободного падения

Данная работа состоит из двух частей. В первой части студенты знакомятся с простейшим вариантом баллистического метода измерения ускорения свободного падения, цифровым осциллографом и статистическими методами обработки результатов косвенных измерений.

Во второй части изложены дополнительные задания по курсу «Введение в информационные технологии», которые выполняются студентами в компьютерном классе, где производится компьютерная обработка экспериментальных данных, полученных при выполнении первой части работы в измерительном практикуме, оформление отчета и его распечатка.

Принцип действия баллистического гравиметра основан на измерении времени прохождения свободно падающего тела через несколько точек, расстояния между которыми известны.

В данной работе свободно падающим телом является магнетик, который при падении проходит через преобразователи (индукционные катушки) и наводит в них ЭДС, величина которой пропорциональна скорости изменения магнитного потока. Регистрация ЭДС и измерение времени пролёта магнетика производится с использованием цифрового осциллографа.



Работы 8.1–8.2

Измерение электрических величин в цепях постоянного и переменного тока

Развитие измерительных приборов в сторону их универсализации и компьютеризации, произошедшее в последние десятилетия, позволяет существенно изменить процесс обучения студентов основам электрических измерений. Для освоения возможностей применения современных электроизмерительных приборов в основном необходимо знание об их функциональном назначении и эквивалентных схем согласования в измерительных цепях.



Цель работы: овладение общепринятыми базовыми методами электрических измерений. Основной упор в упражнениях сделан на правильное использование измерительных приборов для экспериментальной проверки основных законов электрических цепей постоянного и переменного тока.

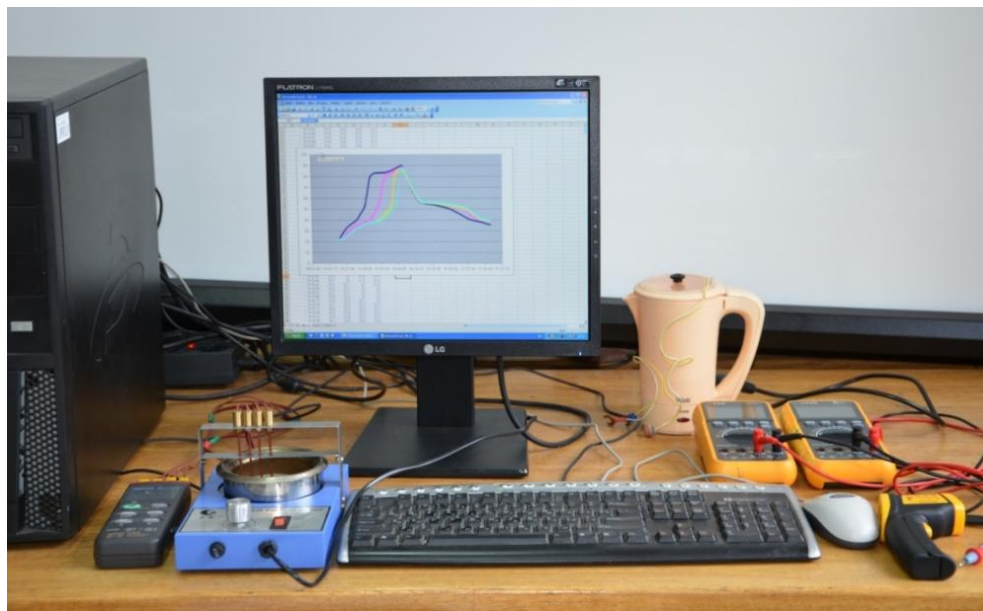
В работе 8.1 проводится измерение тока и напряжения в цепях постоянного тока и определяется влияние входного сопротивления вольтметра на результаты измерения напряжения.

В работе 8.2 студенты знакомятся с основными законами и элементами электрических цепей переменного тока с активными и реактивными сопротивлениями и методами их измерения, согласованием выхода генератора с нагрузкой и измерением коэффициентов формы и амплитуды для сигналов синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы.

Работа 9

Методы измерения температуры

В данной лабораторной работе студенты знакомятся с понятием температуры, температурными шкалами, процессом теплопередачи, поведением кристаллических и аморфных тел при их нагревании и охлаждении, изучают современные методы измерения температуры.

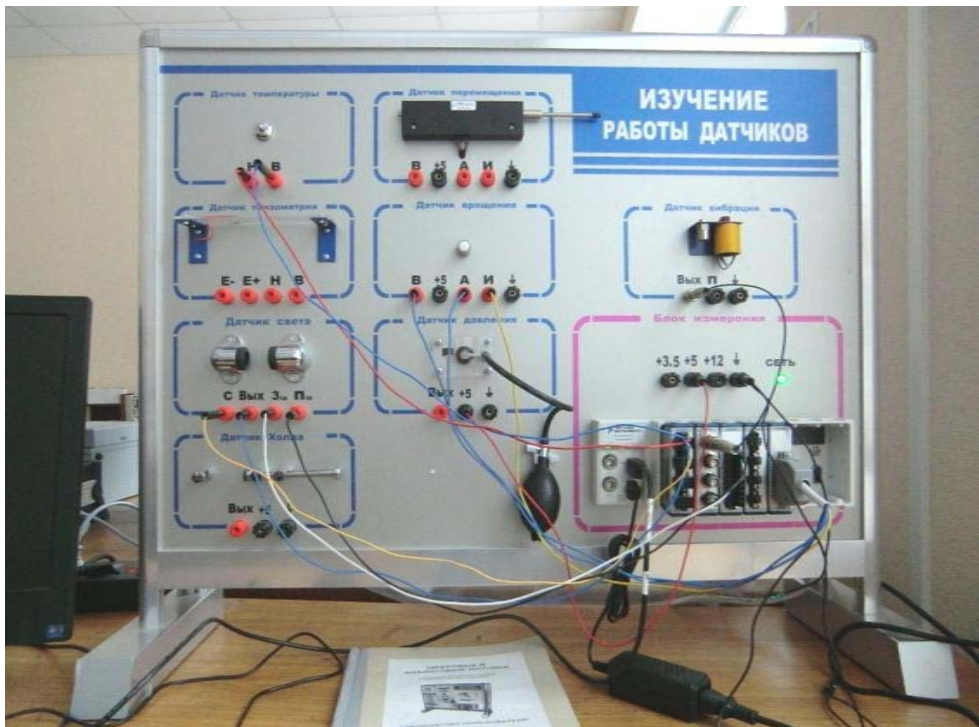


При выполнении эксперимента по измерению температуры используются контактные и бесконтактные методы. Первоначально проводится калибровка контактных датчиков температуры: терморезистора и термопары. Затем измеряется температура различных веществ с использованием термоэлектрического термометра (термопары) и термометра излучения – инфракрасного (ИК) пирометра. Далее производится регистрация температурных диаграмм кристаллических и аморфных тел при их нагревании и охлаждении с использованием современного оборудования.

Работа 10

Датчики для цифровых и аналоговых измерений

При проведении измерений неэлектрических величин, их, как правило, преобразуют в электрический сигнал. Это делается потому, что электрический сигнал можно легко преобразовать в любую желаемую форму, провести усиление сигнала, реализовать необходимую обработку сигнала, кроме того, электрические сигналы можно передавать на большие расстояния. В данной работе имеется восемь различных датчиков/преобразователей.



Цель работы: знакомство с устройством, принципами действия различных датчиков; получение навыка работы с некоторыми, широко применяемыми в экспериментальной практике преобразователями неэлектрических сигналов в электрические: тензодатчиком, термометром сопротивления, индуктивным датчиком перемещений, полупроводниковыми фотоприемниками.

Специализированные работы для студентов медицинского факультета и факультета естественных наук по специальности биология

Программа обучения студентов НГУ нефизических специальностей включает выполнение лабораторных работ в практикумах физического факультета. Базовая часть измерительного практикума для студентов нефизических специальностей основана на лабораторных работах, выполняемых студентами физического факультета. Дополнительно для студентов медицинского факультета и факультета естественных наук по специальности биология имеется 11 лабораторных работ: семь автоматизированных работ по диагностике сердечнососудистой системы и мышц и четыре работы по диагностике слуха и зрения человека, разработанные на основе лабораторного комплекса фирмы RHYWE. Описание лабораторных работ разделено на три части.

В первой части приведено общее описание электрических явлений в живом организме, классификация методов диагностики и используемой электронной аппаратуры. Представлено описание трех лабораторных работ по электромиографии и электрокардиографии, в которых проводится непосредственное измерение биоэлектрических сигналов, вырабатываемых живыми организмами.

Поскольку биопотенциалы, генерируемые различными органами, малы по величине, то при их регистрации необходимо:

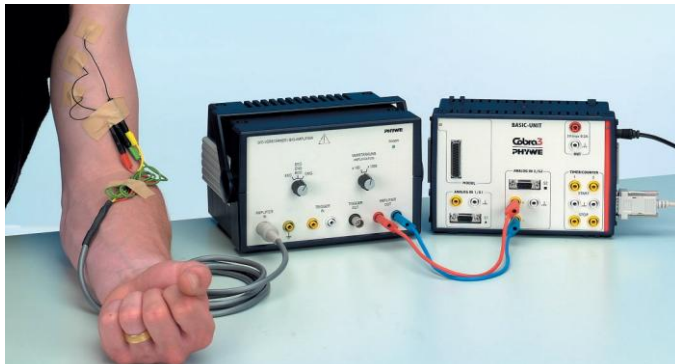
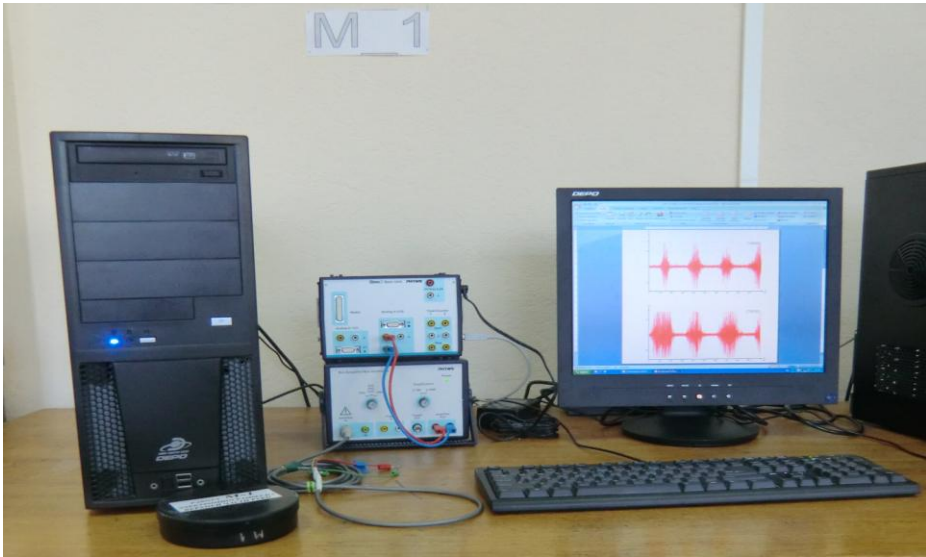
- правильно выбрать зоны наложения электродов,
- создать хороший электрический контакт кожа-электрод,
- выбрать режим работы измерительной системы,
- определить возможные помехи, причины их возникновения и методы устранения,
- правильно провести анализ полученных электромиограмм и электрокардиограммы.

Выполнение каждой лабораторной работы проводят одновременно два студента, один из которых является пациентом, другой выполняет функции доктора. Затем они меняются ролями, так же проводят регистрацию электромиограмм и электрокардиограммы и их анализ.

Работы по электрофизиологической
диагностике

Работа М1

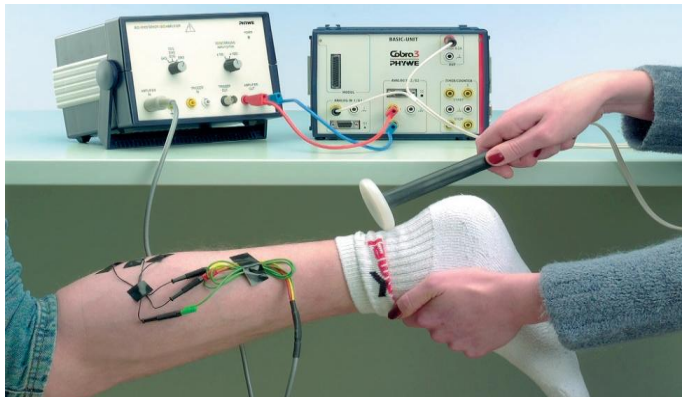
Электромиография на верхней части руки



Цель работы: освоение метода проведения диагностики скелетной мышцы; регистрация электромиограммы (ЭМГ) для сокращённых и расслабленных мышц верхней части руки (бицепса), с использованием поверхностных электродов; определение частоты и амплитуды биопотенциалов при максимальном сжатии мышцы, а также регистрация ЭМГ при обрыве потенциального провода и сравнение с ЭМГ, полученной при правильной регистрации.

Работа М2

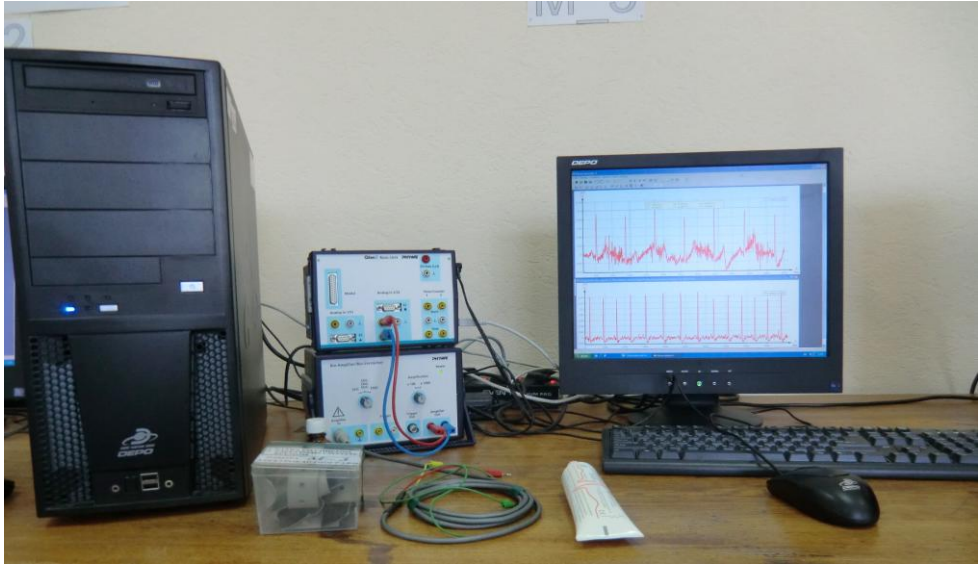
Рефлекс растяжения мышц и определение скорости проводимости



Цель работы: освоение метода проведения диагностики мышцы голени с использованием стимулятора (молоточка), при ударе которым по ахилловому сухожилию в скелетной мышце возникает общий потенциал действия. По полученной электромиограмме определяется латентный период рефлекса и скорость проводимости. Регистрация электромиограмм проводится при различной силе удара и точке удара, а также при обрыве потенциального провода, затем проводится сравнение полученных электромиограмм и рассчитывается скорость распространения сигнала.

Работа МЗ

Электрокардиография



Цель работы: знакомство с работой установки для получения электрокардиограммы (ЭКГ), определение зоны контакта электродов с биообъектом, правильное наложение электродов на выбранные зоны, установка режима работы используемой аппаратуры; проведение регистрации ЭКГ человека, находящегося в спокойном состоянии и после физической нагрузки, а также анализ полученных электрокардиограмм и определение различного вида помех.

Аппараты с преобразователями для функциональной диагностики

Среди характеристик состояния пациента есть и такие, которые не имеют электрической природы: например, акустические (тоны сердца, шумы лёгких), механические (смещение сердца, сокращение мышц, скорость движения перегородок сердца), термические (температура) и т. д. Для измерения неэлектрических сигналов электрическими приборами необходимо преобразовать их в электрический сигнал. Элемент, осуществляющий преобразование неэлектрической энергии в электрическую, называется преобразователем. В зависимости от вида преобразуемой энергии преобразователи имеют разные названия. Например, преобразователь тепловой энергии в электрическую называется термоэлектрическим, световой в электрическую – фотоэлектрическим и т. д.

В данном практикуме в работе для автоматического измерения артериального давления и записи пульса лучевой артерии используются пьезоэлектрический преобразователь, а для измерения температуры тела – термоэлектрический преобразователь.

Работа М4

Фонокардиография

В данной работе студенты знакомятся с установкой для регистрации звуковых процессов, возникающих в сердечно-сосудистой системе. Определяют места наложения акустического зонда, записывают фонокардиограммы в различных местоположениях циркулирующей системы (на запястье руки, верхушке сердца, втором межреберье справа и слева от грудины, сонной артерии), в расслабленном состоянии и при различных уровнях физической нагрузки, а также проводят анализ полученных фонокардиограмм.

Для получения качественной фонокардиограммы необходимы правильная фиксация микрофона (во избежание нежелательного контакта с мембраной микрофона, выбранный участок тела должен быть без волос), отсутствие в помещении посторонних шумов, а также температура не менее +18 °С.



Работа М5

Измерение артериального давления



Цель работы: знакомство с установкой для измерения артериального давления, проведение её калибровки, регистрация кривой изменения давления на обеих руках, определение величины систолического и диастолического давления до и после физической нагрузки.

Приложение

Артериальное давление является одной из наиболее важных характеристик работы сердечно-сосудистой системы организма. Уровень артериального давления определяет объём крови, поступающий к органам тела.

Уровень артериального давления человека *не является постоянной величиной*, а непрерывно колеблется в зависимости от воздействия различных факторов, например *состояния человека*.

Измерение артериального давления может проводиться как в состоянии покоя, так и во время действия физических или эмоциональных нагрузок или в интервалах между различными видами активности.

Точность полученных результатов зависит от соблюдения некоторых правил: положения пациента, оснащения и владения техникой измерения (в том числе использования манжеты соответствующего размера), а также сопутствующих обстоятельств, поэтому во время проведения измерения пациенту необходимо воздержаться от разговоров.

Работа М6

Измерение температуры кожи руки при курении



При выполнении данной работы студенты знакомятся с установкой для измерения температуры кожи руки, проводят её калибровку. Затем регистрируют кривую изменения температуры до, во время и после курения, проводят анализ данных, полученных для заядлых, умеренных, случайных, пассивных курильщиков и некурящих.

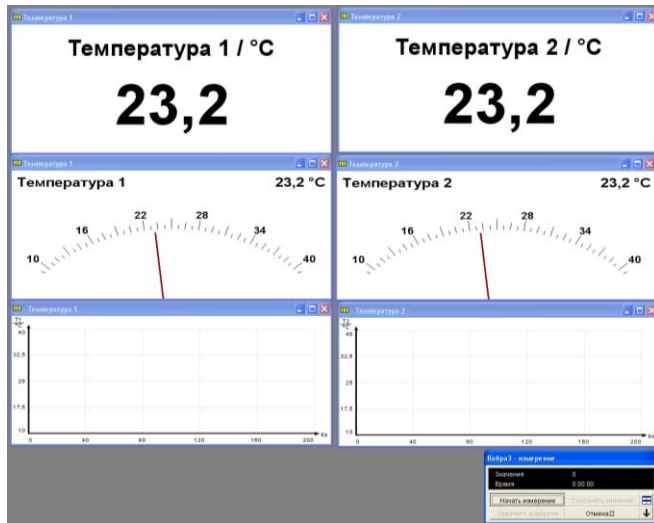
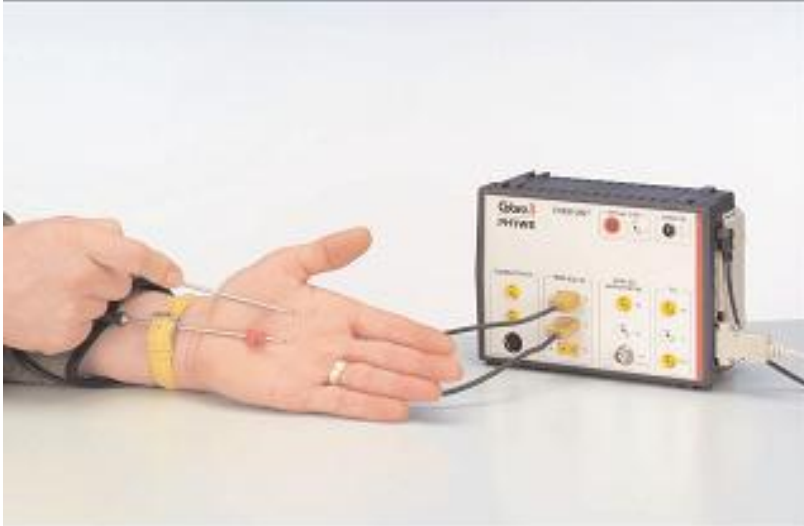
Приложение

Причиной курения является никотиновая и психологическая зависимость. Никотин оказывает стимулирующее действие на центральную нервную систему: повышается выработка адреналина, увеличивается скорость сердечных сокращений, повышается артериальное давление и т. д., что создаёт ощущение удовольствия. Но под воздействием *никотина* во время курения резко повышается давление, сужаются периферические сосуды, изменяется регуляция температуры тела, скорость обменных процессов. Одна выкуренная сигарета увеличивает пульс на двадцать ударов в минуту, поднимает давление на несколько десятков миллиметров, понижает температуру кожи. Эти изменения держатся около тридцати минут.

Курящий подвергает опасности не только собственное здоровье, но и здоровье окружающих его людей. Пассивный курильщик вдыхает те же вещества, что и активный, хотя и в меньших концентрациях. Изменение температуры кожи при курении зависит от индивидуальных особенностей: у заядлых и средних курильщиков выкуривание одной сигареты вызывает понижение температуры кожи всего на 1 °С, у периодических курильщиков наблюдается падение температуры на 2–4 °С. Если доброволец не курил в течение длительного времени или вообще не курит, то у него после курения происходит повышение температуры кожи, а затем за достаточно быстрое время температура возвращается к исходному значению. На экране монитора отображены зависимости изменения температуры у некурящего (верхняя) и у периодического курильщика – (нижняя).

Работа М7

Регуляция температуры тела человека



В работе «Регуляция температуры тела человека» студенты знакомятся с работой установки для измерения температуры, проводят калибровку датчиков температуры (термопар), регистрируют кривые, демонстрирующие регуляцию температуры тела (руки) при обдуве её потоком воздуха комнатной температуры сначала без перчатки, затем с перчаткой, затем при обдуве потоком теплого воздуха. Далее проводится анализ кривых, полученных при различных условиях на ладони испытуемого.

Аппараты для функциональной диагностики с использованием стимуляторов

В **третьей части** пособия представлено описание четырёх лабораторных работ по функциональной диагностике с применением стимуляции: при диагностике слуха – воздействие акустических волн, при диагностике зрения – электромагнитных волн.

Аппараты функциональной диагностики с использованием стимуляторов предназначены для дозированного воздействия определенного типа на организм человека с целью измерения его параметров или индивидуальной реакции.

Стимуляторами называют устройства, которые приводят в состояние возбуждения группу клеток на определённое время и с определённой повторяемостью. Для возбуждения можно использовать физические или химические воздействия.

Существует несколько методов стимуляции живого организма: механические, терапевтические, электрические, магнитные, электромагнитные и другие.

В работах по диагностике слуха и зрения кратко излагаются общие понятия о колебаниях, волнах и влиянии колебаний на организм человека.

Работа М8

Диагностика слуха

В работе по диагностике слуха описываются некоторые понятия акустики, параметры звуковой волны, акустического импеданса известных сред и элементы физиологической акустики.

Цель работы: знакомство с работой установки по диагностике слуха человека, определение частотного диапазона восприятия звука, порога слышимости и верхнего порога слышимости.

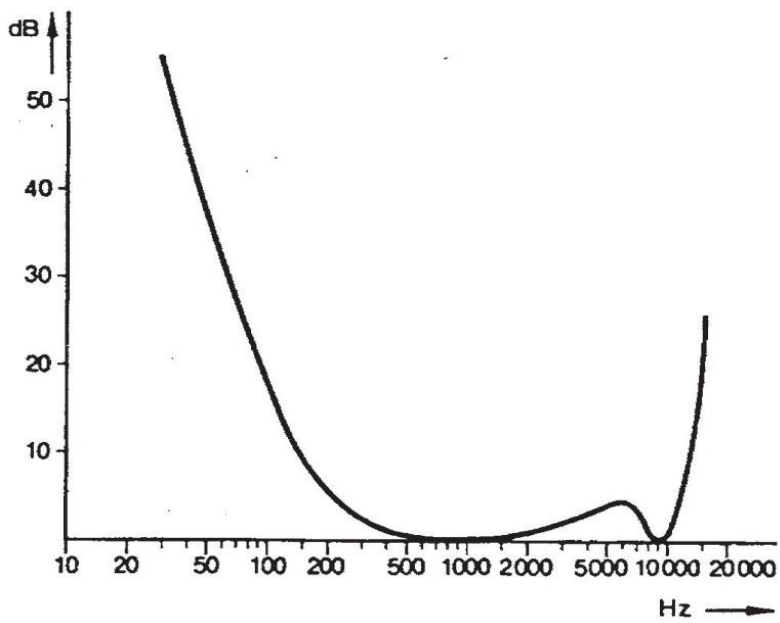


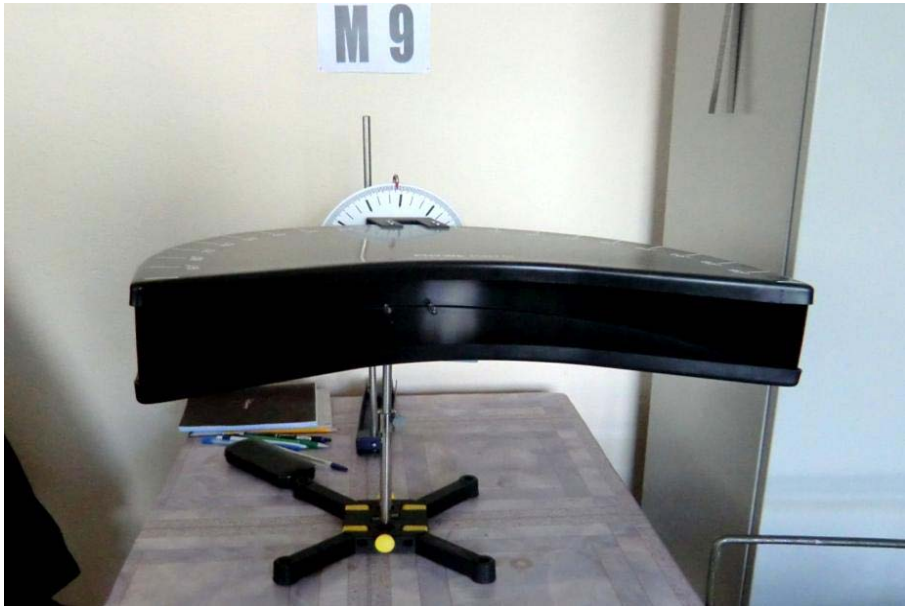
График кривой порога слышимости

Диагностика зрения

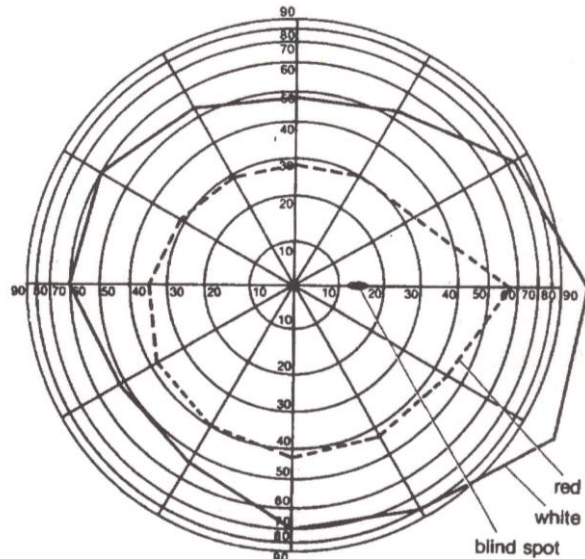
В работах по диагностике зрения кратко изложены представления о свете и цвете, классификации цветов, аддитивном и субтрактивном смешении цветов, физиологии зрения человека, основных свойствах зрения; приведены примерные оптические характеристики глаза человека.

Работа М9

Определение поля зрения глаза



В работе по определению поля зрения глаза проводится знакомство с работой используемых приборов; определение поля зрения правого и левого глаза для белого, синего, красного и зелёного цветов, а также поля обзора и обнаружение слепого пятна.



Примерный вид диаграммы поля зрения

Работа М10

Разрешающая способность глаза

Разрешающая способность глаза (острота зрения) оценивается по минимальному углу зрения φ_{min} (*предельный угол разрешающей способности*), под которым при хорошем освещении две близко лежащие точки ещё видны раздельно.

Наш глаз как приемник света имеет *малую инерционность*. Промежуток времени между воздействиями света на сетчатку и возникновением соответствующего зрительного ощущения называется *постоянной времени ощущения*. Она колеблется в пределах 0,02–0,2 с, что является малой величиной, если учитывать, что глаз одновременно воспринимает очень большой объём информации.



Цель работы: знакомство с работой приборов; определение ведущего глаза; определение частоты мелькания светоизлучающего диода, при которой возникает впечатление непрерывного света; определение порога частоты слияния мельканий для левого и правого глаза относительно направления падения луча светового возбудителя и состояния адаптации глаз.

Работа М 11

Смешение цветов и маскирование цвета

Трёхцветная теория цветового зрения, подтверждённая опытами по оптическому смешению цветов, утверждает, что *все возможные цвета могут быть получены смешением в разных пропорциях трёх взаимно независимых цветов – красного, зелёного и синего*. Одним из доказательств правильности этой теории является нарушение цветового зрения человека. Некоторые люди не ощущают красного, зелёного или синего цвета. Они иначе, чем люди с нормальным цветовым зрением, воспринимают цвета окружающих нас предметов. У людей, не ощущающих красного цвета, отсутствуют красночувствительные элементы, и таких людей называют красно-слепыми. У зелёно-слепых отсутствуют зелёночувствительные элементы. Сине-слепые встречаются очень редко, у них отсутствуют синеощущающие элементы.

Цветовое зрение свойственно многим видам животных. У позвоночных (обезьяны, многие виды рыб, земноводные), а из насекомых у пчёл и шмелей цветовое зрение трихроматическое, как и у человека. У сусликов и многих видов насекомых цветовое зрение дихроматическое, то есть основано на работе двух типов светоприёмников, у птиц и черепах, возможно, четырёх. Поэтому мир красок насекомого существенно отличается от нашего.



Цель работы: изучение законов смешения цветов; освещение цветového пятна (маскирование белого) при помощи белого света или окружающей его области (маскирование чёрного).

Справочные данные

Система единиц СИ

Системой единиц называется совокупность основных и дополнительных единиц измерения с выделенными из них производными единицами.

Международная система единиц СИ состоит из семи основных величин (таблица 5), двух дополнительных (таблица 6) и многочисленных производных (таблица 7). Производные величины определяются через основные. Для каждой основной единицы предусмотрен эталон, по которому производится воспроизведение единицы, например, методом сравнения.

Таблица 5

Основные единицы СИ

Величина	Единица		
	Наименование	Обозначение	
		Международное	Русское
Длина	метр	m	м
Масса	килограмм	kg	кг
Время	секунда	s	с
Электрический ток	ампер	A	А
Термодинамическая температура	кельвин	K	К
Сила света	кандела	cd	кД
Количество вещества	моль	mol	моль

Определение основных единиц

Единица длины – 1 метр (м). Один метр – это длина пути, проходимого светом в вакууме за время $1/299792458$ секунды.

Единица массы – 1 килограмм (кг). Это цилиндр из платиноиридиевого сплава диаметром и высотой 39 мм, который хранится в Международном бюро мер и весов во Франции.

Единица времени – 1 секунда (с). Это время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующим переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Единица тока – 1 ампер (А). Это такой ток, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения и расположенным на расстоянии одного метра друг от друга в вакууме создаёт силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ (Н) на каждый метр длины.

Единица температуры – 1 кельвин (К). Это $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. (Допускается также применение шкалы Цельсия).

Единица силы света – 1 кандела (кд). Кандела – световой поток в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ герц, энергетическая сила которого в этом направлении равна $1/683$ ватт на стерадиан.

Единица количества вещества – 1 моль. Это количество вещества системы, которая содержит столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в $0,012$ килограммах углерода-12.

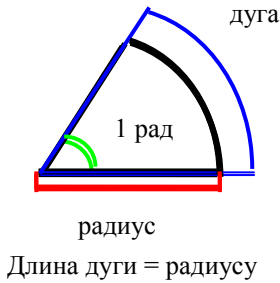
Таблица 6

Дополнительные единицы

Величина	Единица		
	Наименование	Обозначение	
		Международное	Русское
Плоский угол	радиан	rad	рад
Телесный угол	стерадиан	sr	ср

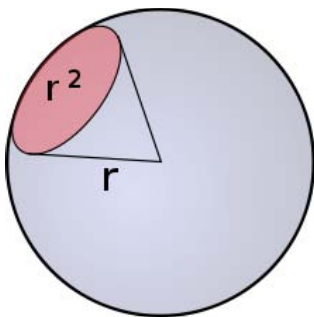
Определение дополнительных единиц измерения

Единица измерения плоского угла – 1 радиан (рад).



Радан – это плоский угол с вершиной в центре окружности, вырезающий на окружности дугу, длина которой равна радиусу этой окружности. Величина полного угла равна 2π радиан. Плоский угол – безразмерная величина.

Единица телесного угла – 1 стерадиан (ср).



Телесный угол – часть пространства, заключённого внутри полости конической поверхности с замкнутой направляющей. Телесный угол так же является безразмерной величиной.

Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, длина которой равна радиусу этой сферы.

Производные величины и их единицы

Производные единицы выводятся через основные с помощью математических операций: умножения и деления. Математическое выражение для производной единицы измерения вытекает из физического закона, с помощью которого она определяется. Например, скорость v – это расстояние L , которое тело проходит в единицу времени t ; $v = L / t = 1 \text{ м} / 1 \text{ с}$, таким образом, единица измерения скорости – $1 \text{ м} / \text{с}$ (метр в секунду).

Некоторым из производных единиц для удобства присвоены собственные названия, поэтому такие единицы можно использовать в математических выражениях для образования других производных единиц.

Таблица 7

Производные величины и их единицы в системе СИ

Величина	Единица			Размерность
	Наименование	Обозначение		
		Международное	Русское	
Частота	герц	Hz	Гц	c^{-1}
Сила	ньютон	N	Н	$кг \cdot м \cdot c^{-2}$
Давление	паскаль	Pa	Па	$Н/м^2 = кг \cdot м^{-1} \cdot c^{-2}$
Энергия, работа	джоуль	J	Дж	$Н \cdot м = кг \cdot м^2 \cdot c^{-2}$
Мощность	ватт	W	Вт	$Дж/с = кг \cdot м^2 \cdot c^{-3}$
Электрический заряд	кулон	C	Кл	$A \cdot c$
Электрический потенциал	вольт	V	В	$Вт/А = кг \cdot м^2 \cdot c^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическое сопротивление	ом	Ω	Ом	$В/А = кг \cdot м^2 \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	сименс	S	См	$А/В = м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot c^3 \cdot A^2$
Ёмкость	фарада	F	Ф	$Кл/В = c^4 \cdot A^2 \cdot кг^{-1} \cdot м^{-2}$
Индуктивность	генри	H	Гн	$Вб/А = кг \cdot м^2 \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
Магнитный поток	вебер	Wb	Вб	$В \cdot c = кг \cdot м^2 \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Плотность магнитного потока	тесла	T	Тл	$Вб/м^2 = кг/с^2 \cdot A$
Световой поток	люмен	lm	лм	св·ср
Освещённость	люкс	lx	лк	св·ср/м ²

Таблица 8

Некоторые основные физические постоянные

Величина	Обозначение или формула	Числовое значение
Скорость света в вакууме	c	299792458 м/с (точно)
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	$8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 1/(\epsilon_0 c^2)$	$1,2566370614 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Заряд электрона	e	$1,60217653(14) \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса электрона	m_e	$0,91093826(16) \cdot 10^{-30}$ кг
Удельный заряд электрона	e/m_e	$1,75888 \cdot 10^{-11}$ Кл/кг
Энергия покоя электрона	$m_e c^2$	0,510998902(21) МэВ
Энергия, соответствующая 1 эВ	эВ	$1,60202 \cdot 10^{-19}$ Дж
Температура, соответствующая 1 эВ		11 606 К
Температура точки таяния льда	T_0	273,15 К
Постоянная Больцмана	k	$1,3806505(24) \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Авогадро	N_A	$6,0221415(10) \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Газовая постоянная	$R = kN_A$	8,314472(15) Дж/(моль К)
Постоянная Планка	h	$6,6260693(11) \cdot 10^{-34}$ Дж с
Гравитационная постоянная	G	$6,67408(31) \cdot 10^{-11}$ м ³ ·с ⁻² ·кг ⁻¹
Волновое сопротивление вакуума	$z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$	376,7 Ом

В скобках указана погрешность последних знаков.

Таблица 9

Ускорение свободного падения на различных широтах

φ , градус	g , м/с ²	φ , градус	g , м/с ²
0	9,780300	50	9,810663
5	9,780692	55	9,815034
10	9,781855	60	9,819141
15	9,783756	65	9,822853
20	9,786337	70	9,826061
25	9,799521	75	9,828665
30	9,793213	80	9,830257
35	9,797299	85	9,831759
40	9,801659	90	9,832360
45	9,806159		

Таблица 10

Скорость звука в газах
при 0⁰ С

Вещество	C , м/с	Вещество	C , м/с
Азот	333,64	Кислород	314
Аммиак	415,0	Метан	430
Аргон	319,0	Неон	433,4
Водород	1284	Пары воды (134 °С)	494
Воздух	331,45	Углекислый газ	274,6
Гелий	965		

Таблица 11

Скорость звука в жидкостях
при 20 °С

Вещество	c, м/с	Вещество	c, м/с
Ацетон	1189	Сероуглерод	1158
Вода	1482,7	Скипидар	1225
Глицерин	1895	Спирт этиловый	1165
Керосин	1315	Толуол	1328
Ртуть	1451		

Таблица 12

Скорость звука в твёрдых телах
при 0 °С

$c_{||}$ – скорость продольных волн, c_{\perp} – скорость поперечных волн,
 c – скорость продольных волн в тонком стержне

Вещество	$c_{ }$, м/с	c_{\perp}, м/с	c, м/с
Алюминий	6400	3130	5240
Вольфрам	5174	2842	4310
Дюралюминий	6400	3120	–
Железо	5930	3230	5170
Латунь	4280–4700	2020–2110	3130–3450
Медь (отожжённая)	4720	2260	3790
Сталь инструмент.	5900–6100	–	5150
Сталь нержавеющая	5740	3092	–

Таблица 13

Уровень звука (L), его интенсивность (I) и звуковое давление

L , дБ	I , Вт/м ²	Амплитуда звукового давления, Н/м ²	Чему соответствует в жизни
0	10^{-12}	$2 \cdot 10^{-5}$	Порог слышимости
10	10^{-11}	$6,3 \cdot 10^{-5}$	Спокойное дыхание
20	10^{-10}	$2 \cdot 10^{-4}$	Тихий сад
30	10^{-9}	$6,3 \cdot 10^{-4}$	Средний уровень шума в зрительном зале, шёпот
40	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-3}$	Шум в жилом помещении
50	10^{-7}	$6,3 \cdot 10^{-3}$	Слабая работа громкоговорителя
60	10^{-6}	$2 \cdot 10^{-2}$	Средний уровень разговорной речи на расстоянии 1 м
70	10^{-5}	$6,3 \cdot 10^{-2}$	Шум внутри трамвая
80	10^{-4}	0,2	Шумная улица
90	10^{-3}	0,63	Автомобильный сигнал
100	10^{-2}	2,0	Автомобильная сирена
110	10^{-1}	6,3	Пневматический молот
120	1	20	Сильные удары грома
130	10	63	Болевой порог
140	10^2	200	Пропеллер самолёта
160	10^4	2000	Реактивный двигатель

Децибел – это безразмерная величина, применяемая для измерения отношения некоторых величин. Величина, выраженная в децибелах, численно равна десятичному логарифму безразмерного отношения физической величины A к определённой физической величине A_0 , принимаемой за исходную, умноженному на двадцать:

$$A_{dB} = 20 \lg \frac{A}{A_0}.$$

Таблица 14

Акустический импеданс (ρC) некоторых сред

Материал	Характеристика		
	Плотность (ρ) $\times 10^3$ кг/м ³	Скорость (C) звука $\times 10^2$ м/с	Акустический импеданс, Н·с/м ³
Воздух	$1,29 \cdot 10^{-3}$	3,31	430
Вода	1	14,8	$1,48 \cdot 10^6$
Мышца	1,04	15,8	$1,64 \cdot 10^6$
Жир	0,92	14,5	$1,33 \cdot 10^6$
Кость	1,9	40,4	$7,68 \cdot 10^6$

Акустический импеданс – комплексное сопротивление, которое представляет собой отношение комплексной амплитуды звукового давления к амплитуде объёмной колебательной скорости.

Таблица 15

Температура кипения воды при различных давлениях

P , мм. рт. ст.	T , °C	P , мм. рт. ст.	T , °C	P , мм. рт. ст.	T , °C
680	96,9138	725	96,6846	770	100,3666
685	96,1153	730	98,8757	775	100,5484
690	97,3156	735	99,0657	780	100,7293
695	97,5146	740	99,2547	785	100,9092
700	97,7125	745	99,4426	790	101,0881
705	97,9092	750	99,6294	795	101,2661
710	98,1048	755	99,8152	799	101,4079
715	98,2992	760	100,000		
720	98,4925	765	100,1838		

Таблица 16

Плотность дистиллированной воды при различных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	Плотность $\times 10^3 \text{ кг/м}^3$	$T, ^\circ\text{C}$	Плотность $\times 10^3 \text{ кг/м}^3$	$T, ^\circ\text{C}$	Плотность $\times 10^3 \text{ кг/м}^3$
0	0,999841	11	0,999606	22	0,997772
1	0,9999900	12	0,999498	23	0,997540
2	0,999941	13	0,999377	24	0,997299
3	0,999965	14	0,999244	25	0,997047
4	0,999973	15	0,999099	26	0,996785
5	0,999965	16	0,998943	27	0,996515
6	0,999941	17	0,998775	28	0,996235
7	0,999902	18	0,998596	29	0,995946
8	0,999849	19	0,998406	30	0,995649
9	0,999782	20	0,998205		
10	0,999701	21	0,997994		

Таблица 17

Номинальная статическая характеристика термоэлектрического преобразователя хромель – алюмель (ХА)

$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$
0	0,000	50	2,022	100	4,095	150	6,137	200	8,137
10	0,397	60	2,436	110	4,508	160	6,539	210	8,537
20	0,798	70	2,850	120	4,919	170	6,939	220	8,938
30	1,203	80	3,266	130	5,327	180	7,338	230	9,341
40	1,611	90	3,681	140	5,733	190	7,737	240	9,745

Таблица 18

Номинальная статическая характеристика термоэлектрического преобразователя хромель – копель (ХК)

$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}, \text{мВ}$
0	0,000	50	3,306	100	6,860	150	10,621	200	15,363
10	0,639	60	3,998	110	7,597	160	11,396	210	16,174
20	1,289	70	4,700	120	8,342	170	12,176	220	16,990
30	1,951	80	5,411	130	9,094	180	12,964	230	17,812
40	2,623	90	6,131	140	9,854	190	13,758	240	18,639

Таблица 19

Значения коэффициента теплопроводности для некоторых веществ

Вещество	Температура $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент теплопроводности Вт/(м К)
Медь	20	382–398
Латунь	20	97–111
Железо	20	58–71
Кирпич	20	0,2–0,7
Дерево	20	0,15
		(Далее средние значения)
Асбест	100	0,15–0,35
Лёд	0	2,21
Вода	20	0,6
Водяной пар	100	0,023
Воздух	0	0,024

Таблица 20

Удельное сопротивление ρ и температурный коэффициент сопротивления α металлических проводников (при 20 °С)

Вещество	$\rho, 10^{-8}$ Ом·м	$\alpha, 10^{-4}$ К ⁻¹
Алюминий (провод)	2,87	37
Вольфрам	5,5	41
Железо (0,1 % С)	12	62
Золото	2,2	39
Латунь	6–9	10
Медь (провод)	1,78	38
Никель	8,7	65
Константан (40 % Ni, 1,2 % Mn, 58,8 % Cu)	50	0,3
Нихром (67,5 % Ni, 1,2 % Mn, 16 % Fe, 15 % Cr)	112	2,5
Олово	12	45
Платина	10,7	39
Серебро	1,6	38
Свинец	20,8	43
Цинк	5,9	37

Примечание. Приведённые в таблице значения являются средними. Их величина зависит от степени чистоты, термообработки и т. д.

Таблица 21

Энергия однократной ионизации газов (на молекулу)

Газ	W, эВ	Газ	W, эВ	Газ	W, эВ
Азот	17	Гелий	24,5	Неон	21,5
Водород	16	Кислород	15,5	Углекислый газ	14,3

Таблица 22

Средняя энергия, расходуемая на образование одной пары ионов α -частицами с энергией 5 МэВ

Вещество	W, эВ	Вещество	W, эВ
Водород	36,6	Углекислый газ	34,1
Гелий	44,4	Кремний	3,6
Азот	36,3	Германий	2,8
Кислород	32,1	Сульфид кадмия	7,3
Аргон	26,3		

Таблица 23

Пробег α -частиц в воздухе (в см) в зависимости от их энергии (при 15 °С и давлении 760 мм рт. ст.)

Энергия, МэВ	,0	,2	,4	,6	,8
3	1,670	1,826	1,987	2,156	2,331
4	2,512	2,700	2,895	3,095	3,302
5	3,514	3,732	3,956	4,184	4,418
6	4,658	4,903	5,145	5,412	5,675

Таблица 24

Таблица средних значений коэффициента излучения

Материал	Коэффициент излучения	Материал	Коэффициент излучения
Алюминий	0,30	Железо	0,70
Асбест	0,95	Свинец	0,50
Асфальт	0,95	Известняк	0,98
Базальт	0,70	Масло	0,94
Полость чёрного тела	1,0	Чёрная оптическая диафрагма	0,95
Латунь окисленная	0,60	Чёрная краска силиконовая	0,93
Латунь полированная	0,03	Красный кирпич	0,90
Уголь	0,85	Пластмасса	0,95
Керамика	0,95	Резина	0,95
Бетон	0,95	Песок	0,90
Медь	0,95	Кожа	0,98
Медь, нагретая с окисным слоем	0,78	Олово не окисленное	0,04
Земля	0,94	Снег	0,90
Заморож. пища	0,90	Сталь	0,80
Горячая пища	0,93	Текстиль	0,94
Стекло (плоское)	0,85	Вода	0,93
Бумага офисная	0,55	Лёд	0,97

Таблица 25

Сравнительные значения трёх шкал температур в целых значениях

Шкала температур			
Фаренгейт	Цельсий	Кельвин	
212	100	373	Точка кипения воды над уровнем моря
194	90	363	
176	80	353	
158	70	343	
140	60	333	
122	50	323	
104	40	313	
86	30	303	
68	20	293	
50	10	283	
32	0	273	Точка таяния (замерзания) льда (воды) над уровнем моря
+14	-10	263	
-4	-20	253	
-22	-30	243	
-40	-40	233	
-58	-50	223	
-76	-60	213	
-94	-70	203	
-112	-80	193	
130	-90	183	
-140	-100	173	Самая низкая зафиксированная температура – Восток, Антарктида, июль 1983 г.

Рекомендуемая литература

Основная

1. *Измерительный практикум. Кихтенко В. Н., Костюрина А. Г., Смирных Л. Н., Дорошкин А. А.* Сборник лабораторных работ для студентов нефизических специальностей. Новосибирск : НГУ, 2001. 141 с.
2. *Измерительный практикум. Костюрина А. Г. Косинов А. Д.* Сборник лабораторных работ для студентов медицинского факультета и факультета естественных наук. Ч. 1. Новосибирск : НГУ, 2010. 57 с.
3. *Измерительный практикум. Косинов А. Д., Костюрина А. Г. Пальчикова И. Г.* Сборник лабораторных работ для студентов медицинского факультета и факультета естественных наук. Ч. 2. Новосибирск : НГУ, 2010. 61 с.
4. *Измерительный практикум. Косинов А. Д., Костюрина А. Г.* Сборник лабораторных работ для студентов медицинского факультета и факультета естественных наук. Ч. 3. Новосибирск : НГУ, 2010. 56 с.
5. *Измерительный практикум. Описание лабораторных работ по физике.* / Под ред. А. В. Багинского. Новосибирск : НГУ, 1999. Ч. 1, Ч. 2. 1999. 217 с., 199 с.
6. *Работа 1.1. Багинский А. В., Брагин О. А., Буфетов Н. С., Зырянов С. О.* Статистическая обработка результатов измерений. Новосибирск : НГУ, 2008. 26 с.
7. *Работа 1.1. Буфетов Н. С., Дорошкин А. А.* Измерение стационарных случайных величин и статистическая обработка результатов. Новосибирск : НГУ, 2017. (В печати).
8. *Работа 1.2. Дорошкин А. А., Брагин О. А.* Измерение энергии образования ион-электронной пары α -частицами в воздухе. Новосибирск : НГУ, 2016. 12 с.
9. *Работы 2.1, 2.2. Костюрина А. Г., Орлов Ю. А.* Основы измерений в электрических цепях. Новосибирск : НГУ, 2012. 66 с.
10. *Работа 2.3. Косинов А. Д., Горев В. Н., Сорокин А. М.* Автоматизированные измерения лабораторным комплексом NI ELVIS. Новосибирск : НГУ, 2008. 33 с.
11. *Работы 3.1, 3.2. Смирных Л. Н., Костюрина А. Г.* Изучение работы осциллографа. Новосибирск : НГУ, 2012. 60 с.
12. *Работы 4.1, 4.2. Багинский А. В., Брагин О. А., Дорошкин А. А.* Компенсационные методы измерений. Новосибирск : НГУ, 2008. 26 с.

13. *Работы 5.1, 5.2. Орлов Ю. А., Косинов А. Д., Костюрина А. Г., Кочевев А. А.* Измерение скорости звука в воздухе. Новосибирск : НГУ, 2017. (В печати).
14. *Работа 6. Пинаев А. В., Кихтенко А. В., Брагин О. А.* Измерение скорости звука в твёрдых средах методом соударения стержней. Новосибирск : НГУ, 2007. 17 с.
15. *Работа 7. Костюрина А. Г., Дорошкин А. А.* Измерение ускорения свободного падения. Новосибирск : НГУ, 2012, 20 с.
16. *Работы 8.1, 8.2. Смирных Л. Н., Костюрина А. Г.* Измерение электрических величин в цепях постоянного и переменного тока. Новосибирск : НГУ, 2008. 81 с.
17. *Работа 9. Косинов А. Д., Костюрина А. Г.* Методы измерения температуры. Новосибирск : НГУ, 2013. 50 с.
18. *Работа 10. Косинов А. Д., Костюрина А. Г.* Датчики для цифровых и аналоговых измерений. Новосибирск : НГУ, 2015, 95 с.
http://www.phys.nsu.ru/measuring/text/measlab_labwork_10.pdf.

Дополнительная

19. *Клаассен К. Б.* Основы измерений (датчики и электронные приборы) : учеб. пособие. Долгопрудный : Интеллект, 2008. 352 с.
20. *Мейзда Ф.* Электронные измерительные приборы и методы измерений. М.: Мир, 1990. 535 с.
21. *Фрайден Дж.* Современные датчики. Справочник. М. : Техносфера, 2005. 592 с.
22. *Сергеев А. Г., Крохин В. В.* Метрология : учеб. пособие. М. : Логос, 2001.
23. *Физические величины:* Справочник. М. : Энергоатомиздат, 1991. 1234 с.
24. *Бутырин П. А., Васьковская Т. А., Каратаева В. В., Материкин С. В.* Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 (30 лекций) / Под. ред. П. А. Бутырина. М. : ДМК Пресс, 2005. 264 с.
25. NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite (NI ELVIS) User Manual / August 2004.
26. *Raton B.* Introduction to NI ELVIS / March 2004.
27. *Князев Б. А., Черкасский В. С.* Начала обработки экспериментальных данных. Новосибирск : НГУ, 1996. 95 с.
28. Информационный портал *Temperatures.ru*. Режим доступа: <http://temperatures.ru/pages/spravochnik>.

29. *Кикоин И. К., Кикоин А. К.* Молекулярная физика : учебное пособие. СПб. : Лань, 2007. 480 с.
30. *Зайченко К. В., Жариков О. О., Кулин А. Н., Кулыгина Л. А., Орлов А. П.* Съём и обработка биоэлектрических сигналов. СПб. : СПбГУАП, 2001.
31. *Блохина М. Е., Эссаулова И. А., Мансурова Г. В.* Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике. М. : Дрофа, 2001.
32. *Большая медицинская энциклопедия/ Под ред. Б. П. Петровского.* М. : Сов. Энцикл. 1984. Т. 23, 25.
33. *Золтан К.* Электроника в медицине. М., 1980.
34. *Богданов К. Ю.* Физик в гостях у биолога. М. : Наука, 1986.
35. *Слоним А. Д.* Эволюция терморегуляции. Л., 1986.
36. *Бишоп Р.* Колебания. М. : Наука, 1986. 190 с.
37. *Ашкенази Г. И.* Цвет в природе и технике. М. : Энергоатомиздат, 1985. 94 с.
38. *Фейман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Феймановские лекции по физике. М. : Мир, 1977. Т. 3–4.
39. Методы физических измерений / Под ред. Р. И. Солоухина. Новосибирск, 1975. 290 с.
40. *Грановский В. А., Сирая Т. Н.* Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
41. РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. 1999. 69 с.

Учебное издание

Косинов Александр Дмитриевич
Костюрина Александра Георгиевна
Брагин Олег Анатольевич

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

ВВЕДЕНИЕ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Редактор *Д. М. Валова*
Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 15.10.2016 г.
Формат 70 x 100 1/16. Уч.-изд. л. 7. Усл. печ. л. 6,5.
Тираж 150 экз. Заказ №
Издательско-полиграфический центр НГУ
630090, Новосибирск-90, ул. Пирогова, 2.