Теория инженерного эксперимента

а) Основная литература

1. Ивановский Р.И.. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. М.: БХВ-Петербург, 2008, –528с.

2. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В.. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. М: НТ Пресс, 2006. – 496с.

3. Двигатели внутреннего сгорания. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС: учебник для вузов/В.Н. Луканин, М.Г. Шатров , Т.Ю. Кричевская и др.// Под ред. В.Н. Луканина, М.Г. Шатрова. М.: Высш. шк. 2005. – 414 с.

4. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. СПб.: BHV, 2009. – 150 с.

.

- **5. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 496 с.**
- **6. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.**
- **7. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложений математики. – М.: Наука, 1983. – 328 с.**
- **8. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. Практическое руководство/ Под ред. Проф. А.К. Любимова. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2006 . – 227 с**

- б) Дополнительная литература

- I. Деденко Л.Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента **- М.:** Изд-во МГУ, 1977.
- 2.Соловьев В.А., Яхонтова В.Е. Элементарные методы обработки результатов - Л.: Изд-во ЛГУ, 1977.
- 3. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок - М.: Мир. 1985.
- 4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.
- 5. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1971. – 381 с.
- 6. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента; Пер с англ. /Под ред. Э.К. Лецкого, Е.В. Марковой. Мир, 1981. – 516 с.

- 7.Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.;Наука, 1965.– 511 с.
- 8. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями; Пер. с англ./ Под ред. Ю.В. Линника. М.: Изд-во иностр. лит., 1956 – 664 с.
- 9. Хан Г., Шапиро С. Статистические методы в инженерных задачах; Пер. с англ./ Под ред.В.В. Налимова. М.: Мир, 1969. – 395 с.
- 10. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами; Пер. с англ./ Под ред. В.Г. Горского. М.: Мир, 1973. – 957 с.
- 11. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1968. – 464 с.
- 12. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1978. – 280 с.
- 13. Гоц А.Н., Горнушкин Ю.Г. Погрешности измерений при экспериментальных исследованиях двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие/ Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2003. – 64 с.

Основные понятия. Общей чертой, объединяющей всех аспирантов, является то, что все они проводят эксперименты. Физики с помощью огромных сооружений исследуют микрочастицы, инженеры определяют надежность различных конструкций, изучает протекание быстроменяющихся процессов, и хотя каждый из них идет своим путем, все они проводят эксперименты. Более того, их методы проведения экспериментов имеют много общего. Они стараются *контролировать* свой эксперимент или *исключить влияние внешних переменных.* Всех их интересует *точность измерительных приборов и точность получаемых данных.* Каждый исследователь стремится *уменьшить число переменных* в любом эксперименте, поскольку это ускоряет его работу и делает ее более экономичной. Каким бы простым ни был эксперимент, вначале необходимо *составить план его проведения.* В процессе проведения эксперимента важную роль играет *обнаружение неполадок,* если рассматриваются неполадки в самом широком смысле.

С этой задачей непосредственно связана *проверка приемлемости получаемых результатов.* Наконец, в процессе любого эксперимента необходимо *анализировать получаемые результаты и давать их интерпретацию,* поскольку без этого решающего этапа весь этот процесс не имеет смысла.

Вполне естественно, что в различных областях науки уделяется различное внимание этим конкретным вопросам. Биолога, естествоиспытателя и социолога, по-видимому, в большей степени, чем инженера или физика, интересуют планирование эксперимента и статистический вывод. Для биологов объектами исследования часто являются растения или животные, каждое со своими уникальными, не поддающимися количественному описанию особенностями. Многие экспериментальные переменные исследователь не может контролировать, и поэтому он должен определенным образом планировать эксперимент, чтобы свести к минимуму или вообще исключить эти внешние воздействия.

Кроме того, биолог вынужден многократно повторять эксперимент, тогда как физик-экспериментатор может удовлетвориться лишь несколькими отсчетами. Однако это не означает, что планирование эксперимента и статистический вывод не интересуют инженера; эти методы находят применение в различных областях техники. С другой стороны, более вероятно, что инженер-экспериментатор, имея сравнительно точные данные, будет использовать графики и формулы для представления полученных им результатов, тогда как биолог часто может ограничиться составлением простой таблицы статистических данных. Однако здесь все же нельзя провести четкого разграничения. В промышленных и производственных экспериментах, где имеет место взаимодействие человека и машины, различие между этими двумя подходами к проведению эксперимента исчезает, и нередко инженеру приходится обращаться к методам, которые были разработаны специалистами весьма отдаленных областей исследования.

Инженерный эксперимент. Рассмотрим инженерный эксперимент, и в частности исследования, связанные с механическими, гидродинамическими и газодинамическими процессами, а также, частично, с испытаниями материалов. Покажем принцип проведения этих экспериментов, используя примеры и методы из многих областей науки, в том числе, и собственных исследований, так как благодаря их общности можно получить представление о возможностях некоторых аналитических и статистических методов. Инженерные эксперименты будут классифицированы по различным признакам: по числу переменных, влиянию внешних переменных, характеру взаимодействия этих переменных и т. д. Различия между промышленными, производственными, исследовательскими, поисковыми, теоретическими и прикладными экспериментами проводить не будем.

Изучение северных сияний, безусловно, представляет собой пример чисто научного исследования. Однако получаемые данные и их обработка могут носить почти такой же характер, как и при исследовании потоков грузовых автомобилей в г. N. и обратно за прошлый год или при исследовании обжига керамических изделий по дням при различных свойствах применяемых материалов, влажности, внешней температуре и т.д.

Эксперименты и экспериментаторы могут отличаться друг от друга, но фактически планирование, проведение и анализ всех экспериментов осуществляются в одинаковой последовательности. Многие современные эксперименты, особенно в таких областях, как электронная, ядерная и ракетная техника, являются исключительно дорогостоящими и на первый взгляд очень сложными.

Для нас, незнакомых с этими областями, может оказаться затруднительным сделать переход от исключительно сложных приготовлений, анализа и мер предосторожности, предшествующих пуску ракеты или введению в строй ядерного реактора, к совершенно несложным, а иногда даже очень простым экспериментам. Однако заметим, что некоторые эксперименты, проводимые для исследования долговечности, например, теплонапряженных деталей поршневых двигателей, являются не менее сложными и дорогостоящими. Каким бы сложным ни был тот или иной эксперимент, представляемые результаты эксперимента по форме мало отличаются (хотя, надо полагать, они существенно отличаются по качеству) от обычных отчетов по лабораторным работам, выполняемым в период обучения в университете по таким темам, как запуск двигателя внутреннего сгорания, проверка асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и т.д.

При пуске исследовательской ракеты составляется несколько отчетов: о работе двигателя; о работе системы наведения; о работе устройств программирования траектории полета; о регистрации космического излучения; об облачном покрове, регистрируемом с помощью фотоэлементов; о поведении подопытных животных и т. д. Каждый из этих отчетов составляется специалистами в определенной области, совместная работа которых позволяет обеспечить пуск исследовательской ракеты.

Любой эксперимент, каким бы сложным он ни казался, заканчивается представлением результатов, формулировкой выводов и, возможно, выдачей рекомендаций другим лицам. Эта информация может представляться в виде графиков или кривых, математических формул или номограмм, таблиц, статистических данных или словесных описаний. Из графиков получается зависимость результата R от переменной X или зависимость R от X и Y в случае параметрических кривых.

Например, при испытании поршневого двигателя необходимо построить внешнюю скоростную характеристику, на которой показать как изменяются показатели двигателя (мощность, крутящий момент, часовой или удельный расход топлива и т.д.) от частоты вращения коленчатого вала. Для получения зависимости R от X, Y и Z необходимо построить несколько графиков или использовать изометрические координаты. Графическое изображение более сложных функций невозможно, так как человек не в состоянии наглядно представить более сложные соотношения. Записывая результаты в виде формул, можно выразить зависимость R от большего числа переменных, однако лишь в немногих экспериментах одновременно исследуется более трех независимых переменных.

Статистические показатели могут быть изящными или громоздкими. Однако выражаемый ими смысл может быть сформулирован в нескольких словах. Статистический показатель может давать информацию о всей совокупности данных и об изменчивости отдельных элементов совокупности. Он может давать информацию о значимости причинного соотношения либо указывать вероятность появления определенного события в будущем на основе прошлого опыта. Математическая статистика используется для описания ошибок приборов и измерительных систем, а также для проверки статистической значимости.

Представление результатов экспериментов в словесной форме всегда было проблемой при проведении научных исследований. Это самый неэффективный способ представления результатов, однако его нельзя игнорировать полностью. Безусловно, результаты определенных экспериментов, проводимых в современных физических лабораториях, просто невозможно представить в словесной форме. В технике такие эксперименты встречаются сравнительно редко, и значительная часть технического отчета обычно включает словесные описания и объяснения.

Таким образом, сложные испытания ракеты или самолета в действительности представляют собой не что иное, как большое число отдельных экспериментов, проводимых с помощью дорогостоящего комплекта испытательного оборудования. Более того, хотя и возможно представить себе исключительно сложный эксперимент, результаты которого удастся постигнуть лишь после многих часов напряженного изучения, сомнительно, чтобы такой эксперимент имел большую ценность. Можно знать о существовании множества сложных взаимосвязей между данными, однако если эти взаимосвязи не выражены в виде графиков, уравнений или словесных описаний, понятных вашим коллегам, то будет лишь напрасно потеряно время. Большинство инженерных экспериментов ведет к определенному действию – принятию решения, продолжению испытаний или признанию неудачи.

Нередко аспиранты, не всегда компетентные во многих вопросах, выполняют дорогостоящие и плохо контролируемые эксперименты вследствие того, что допускают одну принципиальную ошибку. У них полностью отсутствует самопроверка логики и рассуждений после каждого этапа работы. Очень немногие аспиранты серьезно задают себе вопрос, почему именно данный прибор установлен в том или ином месте и почему вместо него не используется какой-либо другой прибор. Это не значит, что нужно задавать тривиальные вопросы. Например: «Почему здесь установлена термопара?», на что быстро следует ответ: «Разумеется, чтобы измерять температуру». В этом случае следовало бы задать примерно такой вопрос: «Почему вы используете железо-константановую термопару, припаянную к коленчатой трубке, обернутую асбестовой лентой и присоединенную к регистрирующему устройству, работающему в интервале температур от 0 до 500 °С со скоростью печатания четыре знака в секунду и точностью (вероятная ошибка? среднее квадратическое отклонение?) ±3%?» Маловероятно, что любой аспирант сможет быстро ответить на эти вопросы.

Выше были заданы вопросы, касающиеся не измерения температуры, а всей установки в целом и самого эксперимента. Был задан вопрос о типе термопары и характере ее присоединения, допуская возможность появления ошибки за счет излучения в диффузионном слое, возможность увеличения ошибки вследствие коррозии или ржавления и учитывая, что неправильно выбранное место расположения термопары может значительно увеличить время достижения установившегося состояния. Нас интересовал также диапазон чувствительности регистрирующего устройства и величина ошибки, а следовательно, диапазон и точность всех измерений, поскольку они неразрывно связаны с проведением рассматриваемого эксперимента. Был задан также вопрос относительно скорости печатания и, следовательно, скорости обработки данных и возможности колебаний условий внешней среды, которые могут изменяться, например, в течение 15 сек.

Короче говоря, подвергнуто тщательному исследованию большое число аспектов этого эксперимента. Могут быть заданы и другие вопросы, заставляющие, например, подумать о порядке и величине изменений переменных, о шаге варьирования переменной в интервале измеряемых значений, о выполнении повторных измерений, когда точность полученных результатов сомнительна, и, возможно, даже о выборе самих переменных.

Очевидно, что эксперименты проводятся независимо от того, будут заданы эти вопросы или нет; при проведении любых экспериментов всегда имеется в виду точность измерений; переменные варьируются до тех пор, пока не будет получена кривая, имеющая хорошую форму; при получении большого разброса данных проводятся повторные эксперименты и т. д.

Однако когда инженер-испытатель просто гадает, какой должна быть требуемая точность каждой группы приборов, совсем не думает о скорости выборки данных и интенсивности изменения внешних условий, разбивает свой эксперимент на этапы «на ощупь» или по интуиции, игнорирует возможность появления систематических ошибок, вносимых регулярной последовательностью измерений, и когда повторные эксперименты проводятся как своего рода запоздалая попытка «зафиксировать» данные, имеющие большой разброс, то с большой вероятностью эксперимент будет продолжительным, дорогостоящим и неточным. Вполне возможно, что такой эксперимент вообще не принесет никакой пользы. Вероятность того, что исследователь случайно натолкнется на наиболее эффективный и хорошо контролируемый план эксперимента или обнаружит какой-либо новый удачный план, почти равна нулю.

В популярной литературе очень часто упоминается о таких случайных событиях, как, например, открытие пенициллина. Не так уж много важных открытий происходит лишь благодаря невымытым бутылкам с культурой микроорганизмов или небрежно составленному плану эксперимента. Настоящий исследователь методически и полностью обдумывает все возможные внешние воздействия и оптимальные методы контроля. Он способен отличить действительно уникальный и необычный эффект от множества побочных воздействий и внешних причин ошибок. Случайные открытия происходят тогда, когда все предвидимые возможности заранее рассчитаны, предсказаны либо исключены и могут появиться лишь совершенно новые, неизвестные ранее возможности.

Иногда наиболее сложной проблемой является правильная формулировка вопросов, связанных с построением плана эксперимента.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ

Метрология – наука о методах измерений, средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Термины и определения основных понятий метрологии нормированы ГОСТ 16263-70 «ГСИ. Метрология. Термины и определения» и приводятся ниже в соответствии с этим документом.

Физическая величина (ФВ) – характеристика одного из свойств физического объекта, общая в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальная для каждого из них.

Значение физической величины – размер этой величины по принятой для нее шкале (например: 15 кг – значение массы тела; 24 кВт – значение мощности двигателя).

Различают *истинное* значение ФВ, идеально отражающее свойство объекта, и *действительное* – найденное экспериментально, достаточно близкое к истинному значению ФВ, которое в практических целях можно использовать вместо последнего.

Измерением называют нахождение действительного значения ФВ с помощью специальных технических средств.

Результат измерения – это значение ФВ, найденное путем ее измерения.

Измерения основаны на некоторой совокупности физических явлений, представляющих собой *принцип измерения* (например, измерять температуру можно по величине теплового расширения какого-либо вещества).

Для реализации принципов измерения применяются различные устройства. Техническое устройство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики, называется *средством измерения* (СИ). Совокупность правил, определяющих принципы измерения и соответствующие СИ, называется *методом измерения*.

Средства измерений подразделяются на **измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные системы, измерительно-вычислительные комплексы, информационно-измерительные системы.**

Измерительным преобразователем называется СИ, предназначенное для получения сигнала измерительной информации в форме, удобной для дальнейшей обработки, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. *Измерительный преобразователь*, на который действует непосредственно измеряемая величина, называется *первичным измерительным преобразователем.*

Часто вместо последнего наименования употребляется тождественный ему термин «датчик», причем в этом случае добавляют наименование той физической величины, для восприятия которой предназначен данный преобразователь (например: датчик частоты вращения, датчик температуры и т.п.). Датчики самостоятельного значения для проведения измерений не имеют, а являются составными частями измерительных приборов, установок и систем.

Измерительным прибором (ИП) называется СИ, предназначенное для получения сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительные приборы подразделяются на *аналоговые* и *цифровые.* У аналогового прибора показания являются непрерывной функцией измеряемой величины; у цифрового показания представлены в цифровой форме, которая является результатом аналого-дискретного преобразования сигнала измерительной информации.

Измерительные приборы могут быть показывающими и регистрирующими. У показывающих приборов результаты измерений считываются наблюдателем со шкалы или с цифрового табло. У регистрирующих приборов предусмотрена регистрация показаний в виде записи на диаграммной бумаге либо путем печати в цифровой форме, либо иным способом.

Измерительной системой (ИС) называют совокупность СИ и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, и предназначенных для автоматических измерений в нескольких точках исследуемого объекта. Как правило, измерительные системы могут производить обработку информации по заданным алгоритмам. Если в состав измерительной системы входит свободно программируемая ЭВМ, такую систему обычно называют *измерительно-вычислительным комплексом* (ИВК).

Измерительные приборы и системы в самом общем виде включают в себя следующие составляющие: датчики; коммутаторы; измерительно-преобразовательное устройство, включающее в себя измерительные цепи, усилители, преобразователи, вычислительные процессоры, базы данных, источники электропитания и др.; а также регистрирующее устройство.

Для обеспечения единства и достоверности измерений в России существует единая метрологическая служба. Деятельность ее определена системой соответствующих государственных стандартов.

Задачи метрологической службы многообразны. Одна из главных – поверка СИ, контроль за их состоянием и применением.

Поверка СИ – важнейшая форма государственного надзора за измерительной техникой. Под поверкой понимается экспериментальное определение погрешности СИ и установление их пригодности к применению. На средства измерений, признанные в результате проверки годными к применению, наносят поверительные клейма или выписывают соответствующие свидетельства.

2. *ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ*

В зависимости от того, каким способом находят числовое значение искомой величины, измерения подразделяются на два вида – прямые и косвенные.

При прямых измерениях результат получают с помощью СИ, градуированных в соответствующих единицах. К прямым измерениям относят, например, измерения температуры термометром, давления – манометром, длины предмета – линейкой.

При косвенных измерениях значение величины не находят непосредственно средством измерения, а вычисляют по результатам измерения одной или нескольких других величин, связанных с искомой величиной известной зависимостью. К косвенным измерениям прибегают в тех случаях, когда интересующую нас величину невозможно или затруднительно измерить прямым путем.

Пример. Мощность двигателя при испытании его на тормозном стенде, как правило, определяют косвенно по измеренным значениям крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала с использованием известного соотношения:

$$N_e = \frac{M_e n}{9550}, \qquad (2.5)$$

где N_e – эффективная мощность, кВт; – M_e эффективный крутящий момент, Н · м; n – частота вращения, мин-1.

3. *ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОГРЕШНОСТЯХ*

Даже при самом тщательном измерении какой-либо ФВ нет возможности получить абсолютно свободный от искажений результат. Искажениями обусловлена так называемая погрешность измерения – отклонение результатов от истинного значения измеряемой величины.

Согласно известному негаэнтропийному принципу информации бесконечно малая погрешность измерения означает бесконечно большое возрастание информации, что принципиально невозможно. В соответствии с этим нельзя провести измерение без погрешности (с нулевой погрешностью).

Принципиальная неустранимость погрешностей требует считать их обязательным элементом процесса измерения. Поэтому в задачу измерения *всегда входит не только нахождение значения самой величины, но и оценка допущенной при измерении погрешности.*

Погрешности измерений *по способу их числового выражения* подразделяют на абсолютные, выраженные в единицах измеряемой величины, и относительные, выраженные в долях этой величины.

Если измеренное значение ФВ равно x а истинное есть $X_И$, то *под абсолютной погрешностью* понимают разность $X - X_И$. Поскольку истинное значение неизвестно, то и величину погрешности, строго говоря, определить не представляется возможным.

Поэтому вводится понятие *предельной абсолютной погрешности* Δx , определяемой неравенством

$$\Delta x \geq \left| x - x_{И} \right| \qquad (3.1)$$

При этом истинное значение оказывается внутри интервала $\{x - \Delta x; x + \Delta x\}$. Практически под $x_{И}$ понимают значения величины x, найденные измерением с помощью СИ и методов высшей точности.

Относительная погрешность измерения определяется как отношение абсолютной погрешности к измеренному значению величины.

Относительная погрешность измерения определяется как отношение абсолютной погрешности к измеренному значению величины. Так как истинное значение величины $x_и$ неизвестно, то пользуются понятием *предельной относительной погрешности* δ_x, которую выражают в долях или процентах от измеренного значения:

$$\delta_x = |\Delta x / x| \qquad (3.2)$$

- или
- $$\delta_x = |\Delta x / x| \cdot 100\ \% \qquad (3.3)$$
- .
- Как сказано выше, абсолютную и относительную погрешности измерения принципиально невозможно вычислить точно; можно лишь оценить их предельные значения. Имея это в виду, слово «предельная» обычно опускают и погрешности, оцениваемые по формулам (3.1) - (3.3), называют просто *абсолютной* либо *относительной погрешностью*.

Погрешности вычисляются для оценки точности измерения или для последующего введения поправок в результат. Точностью измерения называется качество измерения, отражающее степень близости их результатов к действительному значению измеряемой величины. Обычно степень точности измерений характеризуют величиной предельной относительной погрешности. Например, если утверждают, что точность измерения некоторой величины составляет 1,5 %, то это означает, что относительная погрешность измерения данной величины не превосходит 1,5 % (но может быть и меньше).

3.1. Типы погрешностей

Погрешности измерений *по характеру их проявления* подразделяют на систематические, случайные и грубые. Составляющая общей погрешности, остающаяся постоянной или изменяющаяся по определенному закону при повторных измерениях одной и той же величины, называется *систематической погрешностью измерения*. Причинами появления систематических погрешностей могут быть неисправность измерительной аппаратуры, отступление от нормальных условий ее работы, индивидуальные особенности оператора, несовершенство метода измерения и др. Систематические погрешности в принципе могут быть выявлены и устранены, для чего требуется тщательный анализ возможных источников погрешностей в каждом конкретном случае.

Составляющая погрешности измерения, изменяющаяся непредсказуемым образом при повторных измерениях одной и той же величины, называется *случайной погрешностью измерения*. Случайные погрешности, не определенные и не постоянные по величине и знаку, возникают в результате совокупного действия различных случайных причин. Чтобы обнаружить случайную погрешность, необходимо провести серию повторных измерений одной и той же величины в одинаковых условиях и, конечно, с помощью одних и тех же измерительных средств. Если результат каждого измерения будет отличаться от других, то имеют место случайные погрешности. Случайные погрешности невозможно учесть или устранить введением каких-либо поправок; их оценка может быть проведена только по результатам многократных измерений методами теории вероятностей и математической статистики.

Чтобы проиллюстрировать различие между названными видами погрешностей, рассмотрим несколько примеров. Предположим сначала, что испытатель измеряет продолжительность одного оборота равномерно вращающегося диска. Одним из источников погрешностей будет время собственной реакции испытателя при пуске и остановке секундомера. Если бы время реакции всегда было одинаковым, то оба запаздывания, обусловленные реакцией, компенсировали бы друг друга. Фактически время реакции испытателя изменяется. Он может промедлить при пуске и таким образом недооценить время оборота или же больше задержаться при остановке секундомера и в этом случае переоценить время. Так как обе возможности равновероятны, то знак эффекта *случаен*.

При многократном повторении измерения испытатель иногда будет переоценивать время, а иногда – недооценивать. Таким образом, переменное время реакции проявится в различии полученных результатов. Анализируя разброс результатов методами статистики, мы можем получить вполне достоверную оценку погрешности этого типа.

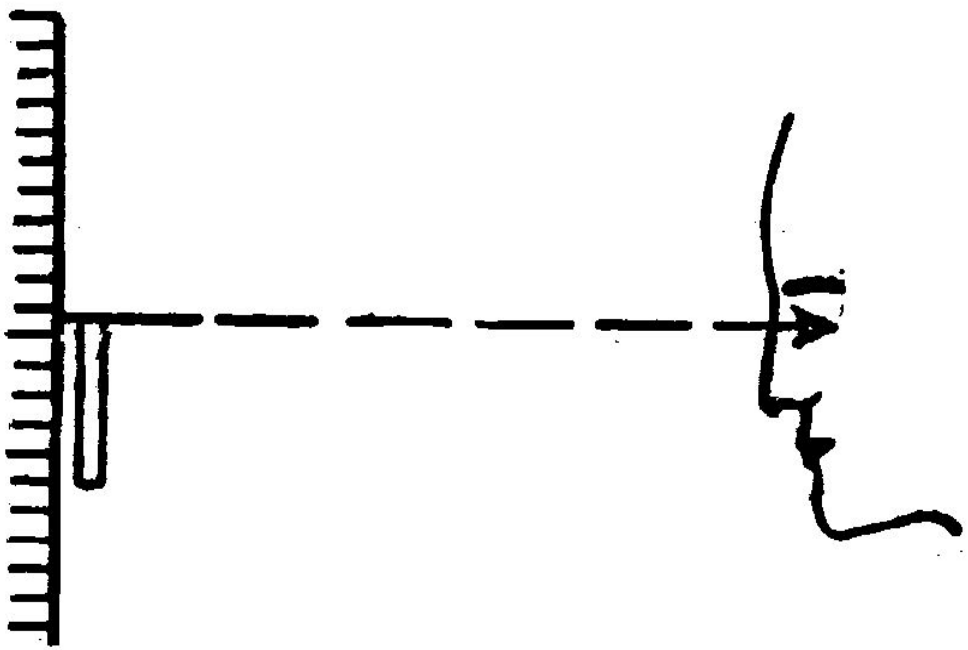
С другой стороны, если при измерениях секундомер постоянно отстает, то все измеренные значения времени будут недооценены и никакое количество повторений (с тем же секундомером) не обнаружит этого источника погрешностей. Погрешность такого типа называется *систематической*, поскольку она всегда смещает результат измерений в одну сторону (если секундомер отстает, то всегда недооцениваем время, если спешит — всегда переоцениваем). Систематические ошибки нельзя обнаружить статистическими методами.

В качестве второго примера проявления случайных и систематических погрешностей рассмотрим измерение длины стержня с помощью линейки. Один из источников погрешности — необходимость в интерполяции между отметками шкалы, и эта погрешность, очевидно, случайна (при интерполяции с равной вероятностью как переоцениваем, так и недооцениваем результат). Но имеется также вероятность того, что линейка дефектна, а этот источник погрешности будет, вероятно, приводить к систематической ошибке. Например, если линейка имеет начальную кривизну, то, проведя измерения с вогнутой стороны, испытатель всегда недооценивает результат. Подобно этим двум примерам почти все измерения подвержены как случайным, так и систематическим погрешностям.

Типичные источники случайных погрешностей — это незначительные ошибки наблюдателя (как в случае интерполяции); небольшие помехи, воздействующие на аппаратуру (например механические вибрации); проблемы определения истинного значения некоторой величины и др. Возможно, наиболее очевидная причина систематической погрешности – это нарушение калибровки приборов (подобно отстающему секундомеру или стрелочному прибору, стрелка которого до начала измерений не была установлена на нуль).

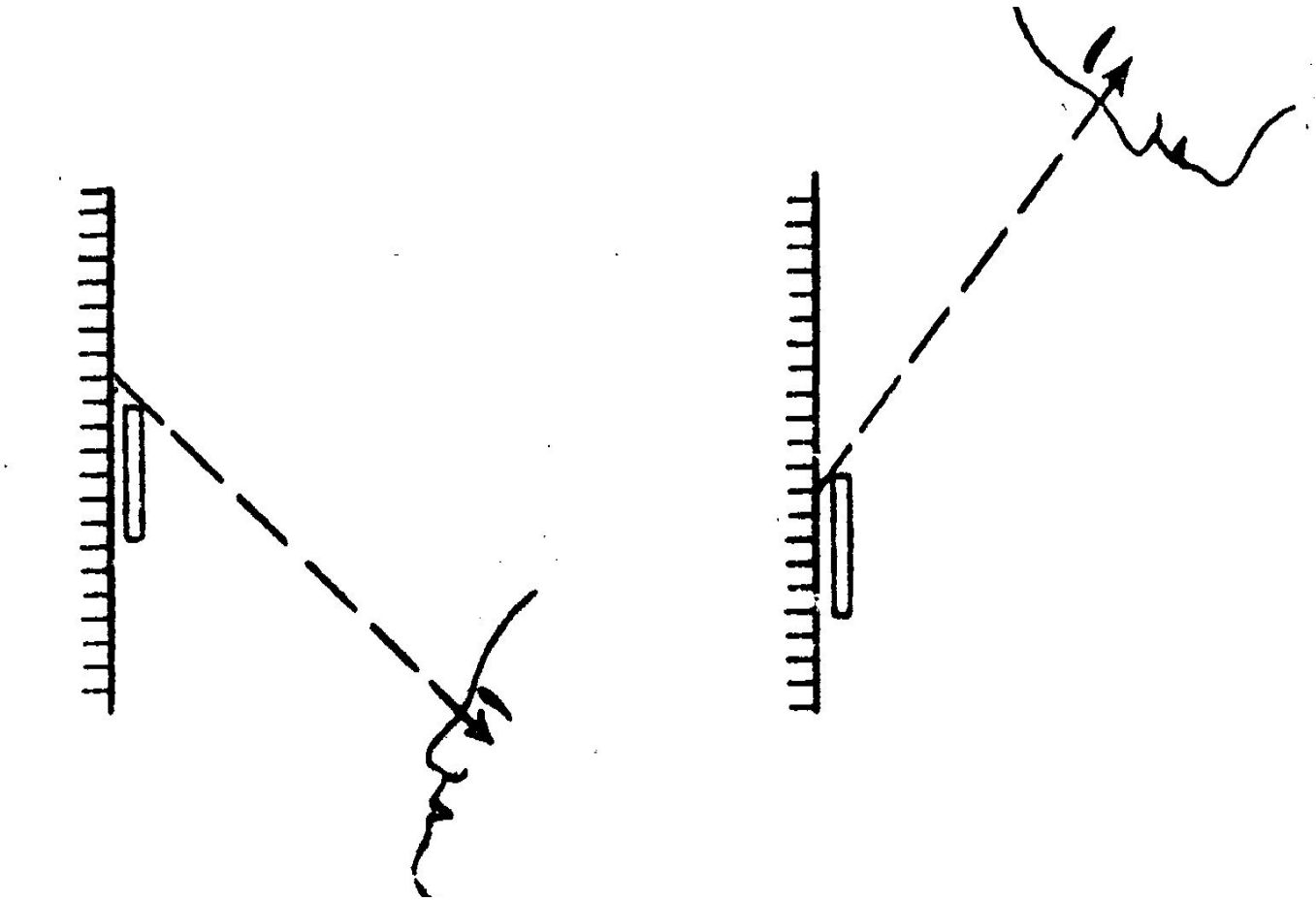
Различие между случайными и систематическими погрешностями не всегда можно четко определить. Так при изменении положения глаза наблюдателя по отношению к шкале стрелочного прибора (например, обычным часам) результаты считывания будут изменяться. Этот эффект называется *параллаксом*, и он приводит к тому, что правильное считывание со шкалы возможно только в случае, когда глаз наблюдателя расположен точно перед стрелкой (рис. 1).

Рис. 1. Правильное положение глаза при отсчете делений шкалы



Даже очень аккуратный экспериментатор не сможет расположить глаз *точно* перед стрелкой; следовательно, все измерения будут содержать малые погрешности, связанные с параллаксом, и эта погрешность будет, вероятно, случайной. С другой стороны, неосторожный экспериментатор, который поставит стрелочный прибор сбоку от себя и забудет о влиянии параллакса, внесет в измерения систематическую погрешность. Таким образом, один и тот же эффект, *параллакс*, может привести к случайным погрешностям в одном случае и систематическим – в другом (рис. 2).

Рис. 2. Ошибка параллакса при отсчете делений шкалы



Учет случайных погрешностей совершенно отличен от учета систематических. Статистические методы дают достоверную оценку случайных погрешностей и указывают на точно определенный способ их уменьшения. С другой стороны, систематические погрешности трудно оценить, и даже обнаружить. Опытный экспериментатор должен уметь предвидеть источники систематических погрешностей и проводить экспериментальные исследования так, чтобы при измерениях все оставшиеся систематические ошибки были значительно меньше требуемой точности. Для этого потребуется, например, поверка стрелочных приборов по принятым стандартам, их исправление или даже, если необходимо, замена приборов на другие.

Погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях, называется *грубой погрешностью*. Грубые погрешности сильно искажают результаты измерений. Они обычно связаны с резким нарушением условий измерений. Причиной могут быть неисправность аппаратуры, неправильные действия наблюдателя, непредвиденное постороннее вмешательство и т. п. Результаты измерений, содержащие грубые погрешности, должны быть отброшены как недостоверные. Для выявления грубых погрешностей разработаны специальные приемы.

3.2. Систематические погрешности. Причины возникновения и способы устранения

Природа систематических погрешностей обычно обусловлена спецификой конкретного эксперимента, особенностями применяемых средств и методов измерений. Вместе с тем существуют некоторые общие причины появления систематических погрешностей, в соответствии с которыми их подразделяют на методические, инструментальные и субъективные.

Методические погрешности появляются от несовершенства метода измерения, недостаточно правомерного использования упрощающих предположений и допущений, применения неточных эмпирических формул, влияния измерительного прибора на объект измерения. Например, результат измерения температуры с помощью термопары может содержать методическую погрешность по причине искажения температурного поля исследуемого объекта из-за отвода теплоты по электродам термопары.

Инструментальные погрешности зависят от погрешностей применяемых СИ. Конструктивное несовершенство измерительных приборов, их неисправность или неправильная градуировка, отклонение от нормальных условий их эксплуатации – все это причины инструментальных погрешностей.

Примеры систематической погрешности. Температура измеряется термометром со смещенной (сдвинутой) шкалой. Если шкала сдвинута, например, на 2 0С, то систематическая погрешность (в данном случае инструментальная) равна двум градусам и постоянна по величине и знаку.

Возможен случай, когда величина погрешности периодически меняется с изменением измеряемой величины. Например, такое явление будет наблюдаться, если пользоваться секундомером, у которого центр циферблата не совпадает с осью вращения стрелки.

Поскольку систематические погрешности в конкретных измерениях имеют вполне определенные значения и знак, они могут быть учтены введением поправок. Поправкой называется значение величины, прибавляемое к полученному при измерении значению с целью исключения систематической погрешности. Для определения величины поправки требуется, как правило, тщательный анализ метода измерения.

В некоторых случаях используют поправочный множитель-число, на который умножают результат измерения для исключения систематической погрешности.

Поправка, или поправочный множитель, определяется при помощи поверки средства измерения; применяются также расчетные способы нахождения поправок.

Существуют специальные методические приемы организации измерений, устраняющие систематические погрешности, такие, например, как метод замещения и метод компенсации погрешности по знаку.

При проведении автоматических измерений широко используют схемные методы коррекции систематических погрешностей, например: компенсационное включение преобразователей, введение температурной коррекции и др.

Большие возможности в технике измерений дает использование измерительных средств, содержащих микропроцессорные системы. С помощью последних удается производить исключение или коррекцию многих видов систематических погрешностей, что позволяет существенно повысить точность измерений.

Субъективные погрешности чаще всего вызываются неправильными отсчетами показаний прибора человеком (оператором). Это может случиться, например, из-за неправильного направления взгляда при наблюдении за показаниями стрелочного прибора (погрешность от параллакса). Использование цифровых приборов и автоматических методов измерения позволяет исключить погрешности такого рода.

Существует также особый вид систематических погрешностей измерений – так называемые *динамические погрешности*. Они проявляются при измерении физических величин, изменяющихся во времени, а причина их возникновения – несоответствие инерционных свойств измерительных приборов скорости изменения измеряемой величины.

Динамические погрешности могут достигать 100 %, а в некоторых случаях – и более высоких значений. Динамические погрешности отличают от инструментальных, поскольку они связаны не столько с самими средствами измерений, сколько с условиями, при которых они работают. Динамические погрешности устраняют иными способами, нежели инструментальные.