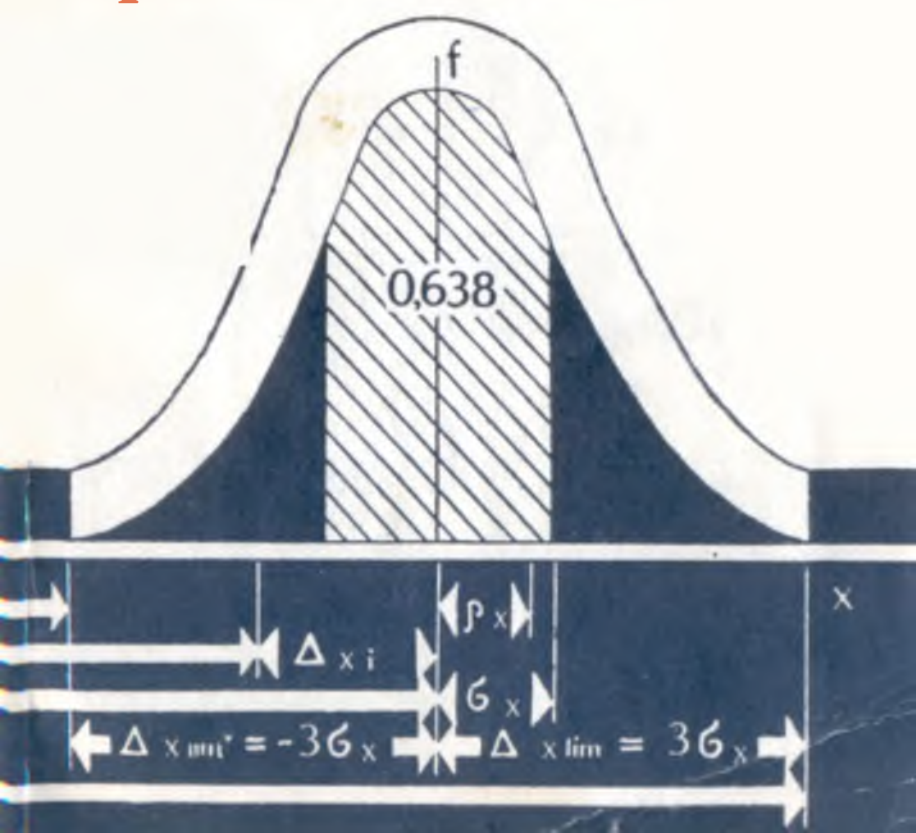


Ф.С. ЗАВАЛИШИН, М.Г. МАЦНЕВ

# Методы исследований по механизации сельско- хозяйственного производства



**НАУЧНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ**

– процесс установления,  
процесс выработки  
новых научных знаний

**МЕТОД**

– совокупность приемов  
или операций  
практического или  
теоретического  
познания и освоения  
действительности,  
подчинения решению  
конкретной задачи

**ЗАКОН**

– связь, существующая,  
устойчивая, общая  
необходимая и  
повторяющаяся

**ИДЕАЛИЗАЦИЯ**

– мысленное создание  
абстрактных объектов,  
обладающих предель-  
ными свойствами  
реального объекта

**АБСТРАГИРОВАНИЕ**

– мысленное выделение,  
вычленение наиболее  
существенных свойств,  
отношений и отвлечение  
от других, несуществен-  
ных

**ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ**

– распространение получен-  
ного положения на  
неисследованные, но  
аналогичные явления,  
процессы

Ф.С.ЗАВАЛИШИН, М.Г.МАЦНЕВ

# Методы исследований по механизации сельско- хозяйственного производства



МОСКВА «КОЛОС» 1982

Авторы: профессор, доктор технических наук *Завалишин Ф. С.*; доцент, кандидат технических наук *М. Г. Мацнев* (Воронежский СХИ).

Рецензенты: доценты, кандидаты технических наук *Шаров Н. М., Зангиев А. А.* (МИИСП); старший научный сотрудник, заведующий отделом *П. Н. Бурченко* (ВИМ).

**Завалишин Ф. С., Мацнев М. Г. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства.— М.: Колос, 1982, 231 с.**

В книге кратко изложены методология и поэтапное развитие научного исследования, сущность наиболее распространенных современных механико-математических методов с примерами общих задач, связанных с механизацией сельскохозяйственного производства. Рассмотрены с конкретными примерами основные положения программы и методики эксперимента, вопросы точности измерений как основы их разработки, методы обработки и анализа опытных данных, а также организация личной работы исследователя.

Книга предназначена для аспирантов, молодых специалистов, решивших связать свою деятельность с научными исследованиями, для специалистов, работающих на производстве и внедряющих научные рекомендации, а также для студентов.

Таблиц 10. Иллюстраций 28. Библиографий 81.

# Введение

Решение продовольственной программы, выдвинутой XXVI съездом КПСС, неразрывно связано с подъемом сельского хозяйства, а следовательно, и с увеличением уровня механизации сельскохозяйственного производства, повышением эффективности использования техники, что, в свою очередь, ставит многие проблемы перед наукой. Предстоит создать поточные автоматизированные технологические линии и предприятия; широко использовать электрическую энергию непосредственно в технологических процессах; разработать технологию и создать технические средства для производства и приготовления высококачественных кормов на промышленной основе; широко применять установки для обслуживания животных, регулирования микроклимата в помещениях, санитарной профилактики и лечения животных. Кроме того, необходимо повысить производительность агрегатов путем увеличения основных параметров машин: рабочих скоростей до 9...15 км/ч, мощности двигателей, пропускной способности комбайнов, грузоподъемности транспортных средств; повысить надежность сельскохозяйственной техники, снизить трудоемкость технического обслуживания; расширить применение комбинированных машин и агрегатов, совмещающих несколько операций в одном проходе, увеличить номенклатуру самоходных уборочных машин, более маневренных и позволяющих сократить потребность в наиболее квалифицированных кадрах. Далее надо расширять унификацию узлов машин, перейти на производство семейств машин различных типоразмеров; улучшить условия труда и техники безопасности; внедрить средства автоматизации, прежде всего для регулировки загрузочных режимов, глубины хода рабочих органов, контроля технологических операций.

Причем предстоит не только развивать и совершенствовать технику в рамках этих направлений, но и разработать новые проблемы и направления.

Большие задачи связаны с улучшением использования сельскохозяйственной техники, повышением ее сменной, дневной и сезонной выработки, экономией топлива и смазки, увеличением надежности отремонтированных машин, снижением затрат на выполнение работ и др. Самостоятельной и очень важной задачей является повышение качества механизированных работ с получением наилучшей производительности без потерь продукта.

Предстоит расширять и углублять научные основы инженерного проектирования операций, производственных процессов и сельскохозяйственного производства в целом.

Исследования по механизации сельского хозяйства будут углубляться и расширяться, естественно, с привлечением в эту область специалистов, не имеющих опыта исследования.

Предлагаемый труд послужит более быстрому освоению методов исследования, ускорению «ввода» молодежи в науку. Однако, как отмечено в Отчетном докладе ЦК КПСС XXVI съезду

партии, «Решающий, наиболее острый участок сегодня — внедрение научных открытий и изобретений. Научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы следует теснее сомкнуть — экономически и организационно — с производством...». Поэтому специалист сельского хозяйства должен уметь разобраться, оценить и творчески подойти к научным рекомендациям и процессу производства. Процессы же выработки обоснованного решения и нового научного знания близки по форме и содержанию.

В книге изложен общий подход к научному исследованию в виде основных его этапов, начиная от наблюдаемого явления до внедрения научных разработок. Проблемы механизации сельского хозяйства весьма обширны, и для решения их применяются разнообразные методы. Изучить детально все методы, используемые при исследовании обширных проблем механизации, каждому исследователю не представляется возможным, даже для общего ознакомления с ними по различным литературным источникам надо тратить много времени. Поэтому в книге коротко, с принципиальной стороны рассмотрены наиболее распространенные механико-математические методы, решаемые задачи с их использованием и дан перечень соответствующей литературы. Должное внимание уделено организации личной работы исследователя — подход к исследованию, организация труда, система в работе и др. Подробно рассмотрена методика исследования. С целью более глубокого понимания методики экспериментального исследования проанализированы основные вопросы точности измерений. В заключение работы изложены методы обработки и анализа опытных данных.

Точность измерения, программа и методика исследования, обработка опытных данных и анализ их сопровождаются многочисленными примерами, применительно к решаемым задачам по механизации сельского хозяйства.

# Глава I

## Задачи и этапы научного исследования

### 1. Определение и значение науки

Под термином «наука» в широком смысле понимается как деятельность по получению новых знаний, так и результат этой деятельности. Наука — система знаний об объективном мире, законах его развития или система знаний о законах, свойствах и отношениях тех или иных объектов.

**Цель науки** как сферы деятельности человека — практическое применение знаний о мире и его законах в человеческой деятельности.

**Задачи науки** — познание (т. е. установление и объяснение сущности) закономерностей объективного мира и раскрытие путей использования новых знаний на практике.

Наука не стоит на месте — она непрерывно развивается, пополняется.

**Научное исследование** — это процесс установления, процесс выработки (производства) новых научных знаний.

По непосредственному отношению к практике исследования разделяют на фундаментальные и прикладные.

*Задачи фундаментальных исследований* — познание законов, управляющих поведением базисных структур, таких, как атом, клетка, галактика и т. д. На первый взгляд эти исследования далеки от практики. Но такие представления ошибочны, потому что качественные сдвиги, принципиально новые решения неизвестных крупных проблем невозможны без понимания их сущности. Фундаментальные науки, как явствует из названия, служат фундаментом для прикладных. Без позна-

ния атома, в частности деления атома урана, не заработали бы атомные электростанции.

Проявления законов, выявленных фундаментальными науками, уточняются для конкретных систем уже прикладными науками.

*Задачи прикладных исследований* — раскрытие путей применения результатов фундаментальных исследований на практике путем решения познавательных (теоретических) и практических проблем. В этих исследованиях также устанавливаются взаимосвязи между явлениями, объясняется их сущность. Но взаимосвязи эти носят не общий, а частный характер.

Задачи прикладных наук конкретны. Прикладные исследования направлены на разработку тех или иных технологий, создание новых, более совершенных машин, посвящаются обоснованию оптимальных параметров и режимов работы технических устройств, а также определению и оценке качества функционирования систем. На основе прикладных исследований созданы атомные электростанции, разработаны новые технологии и машины.

**Испытания** близки к научному исследованию по форме, но отличаются целями, задачами и содержанием. Испытание отдельных машин, систем и механизмов сводится к проверке и оценке их конструктивных и эксплуатационных свойств, установлению соответствия выполненных конструкций техническим условиям, а также выбору лучших из них. Так, широко практикуют испытания сельскохозяйственной техники на соответствие конструкций машин агротехническим или зоотехническим требованиям, затем выдают рекомендации по выбору лучших образцов.

Все технические науки прикладные. На долю всех прикладных наук приходится до 80...90 % объема исследований и ассигнований.

Человечество в процессе своей деятельности (практики) непрерывно развивало и совершенствовало производительные силы общества — предмет труда, орудия труда и самого человека. На разных этапах развития производительных сил наука играла разную роль и в эпоху научно-технического прогресса она стала непосредственной производительной силой. Изменились связи науки с производством. Проявляется это в основном в индустриализации науки (исследования требуют ип-



дустриальной базы для изготовления сложнейших установок и приборов, отработки производства), в сокращении времени от появления идеи до ее реализации (для фотографии, например, открытой в XVIII в., потребовалось более 100 лет, для телефона, изобретенного в XIX в.,— 56 лет, а транзистора и лазера, произведенных в XX в.,— только 2...3 года), в упрочении связи с производством (наука стала выполнять прямые заказы предприятий; лаборатории и институты становятся как бы цехами предприятий).

Партия и правительство в своей деятельности, решениях и постановлениях учитывают и подчеркивают роль науки в современном производстве, уделяют постоянное и неослабное внимание ее развитию.

В решениях XXV и XXVI съездов КПСС дана глубоко обоснованная программа дальнейшего развития фундаментальных и прикладных исследований в нашей стране. Она предусматривает преимущественное развитие новейших отраслей естествознания и исследования проблем, определяющих современный научно-технический прогресс, намечает меры по укреплению связи науки с производством, быстрейшему внедрению ее достижений в народное хозяйство, повышению эффективности работы ученых.

В докладе XXVI съезду товарищ Л. И. Брежнев сказал: «Страна крайне нуждается в том, чтобы усилия «большой науки», наряду с разработкой теоретических проблем, в большой мере были сосредоточены на решении ключевых народнохозяйственных вопросов, на открытиях, способных внести подлинно революционные изменения в производство».

Большое внимание придается и усилению роли науки в сельскохозяйственном производстве.

Вся стратегия и тактика интенсификации сельского хозяйства базируется сейчас на научно-техническом прогрессе, что предъявляет новые требования к научным исследованиям, начиная от организации научного поиска и кончая реализацией разработок.

В дальнейшем предусмотрено повысить роль науки в решении задач эффективного использования всех видов материальных ресурсов, создания и внедрения ресурсосберегающих техники и технологии, расширения производства высококачественной продукции.

## 2. Методология научного исследования

Научное исследование подчиняется определенным закономерностям и правилам. На основании этих закономерностей и правил разрабатываются общие и специфичные для каждого процесса приемы достижения конкретного конечного результата и его оценки.

**Метод** — совокупность приемов или операций практического и теоретического познания и освоения действительности, подчиненная решению конкретной задачи.

**Методология исследования** — это учение о методах научного познания и преобразования мира.

Основой методологии научного исследования, на которой базируются общие принципы, формы и способы достижения новых знаний, является материалистическая диалектика — наука о наиболее общих законах развития объективного мира.

Мир и его закономерности объективны, существуют независимо от познающего (исследующего) его субъекта. Это требует объективности как метода исследования, так и его результата. Мир и его закономерности познаваемы. Наблюдаемые или открытые факты и явления могут быть объяснены, их сущность раскрыта — в этом заключаются и истоки и задачи исследования.

*Материалистическое* понимание истории общества и введение практики как исходного пункта познания, его цели и критерия истины определяют общий путь получения новых знаний.

*Диалектическая* взаимосвязь явлений объективного мира, основные законы диалектики отражают наиболее общие закономерности движения (развития) этих явлений. С одной стороны, они требуют всесторонности и конкретности исследования; выдвигают в качестве стратегического принципа науки исследование развития и принцип саморазвития, когда важнейшим атрибутом науки выступает не только знание, но и способность к приобретению знаний; указывают на взаимосвязь, взаимопроникновение, единство в методе научного познания таких противоположностей, как объективное и субъективное, чувственное и логическое, опытное и теоретическое, реальное и абстрактное, необходимость и случайность, анализ и синтез и т. д. С другой стороны, они показывают основные вехи и отношения на пути к новому знанию: необходимость в новом зна-

нии, исходя из противоречий между старым знанием и потребностью практики, связь выработанного нового знания со старым, скачок к новому знанию в результате количественного накопления знаний (фактов).

Отклонение от диалектического материализма, пренебрежение его отдельными положениями ведут к тому, что исследование теряет научные черты (объективность, доказательность и др.), результаты его становятся малоценными, порой же, потеряв много времени и сил, исследователь стихийно выходит на путь научного метода.

**Закон** с позиции материалистической диалектики — это связь, существенная, устойчивая, общая, необходимая и повторяющаяся. Но материалистическая диалектика не поглощает методы конкретных наук, потому что последние изучают свои специальные предметы. В этих науках познаются не наиболее общие законы, а законы частные и отдельные закономерности, к которым чаще всего и сводится изучение проблем механизации сельского хозяйства.

Материалистическая диалектика вырабатывает всеобщий метод познания. Помимо всеобщего, существуют общие и специальные методы. Они как бы образуют иерархическую схему, вверху которой материалистическая диалектика, затем фундаментальные науки, потом более общие науки и, наконец, специальные (частные) науки.

В науке выработан ряд принципов научного мышления: абстрагирование, идеализация, экстраполяция и др.

**Абстрагирование** — мысленное выделение, вычленение наиболее существенных свойств, отношений и отвлечение от других, несущественных, при абстрагировании не познается предмет как таковой, познаются отдельные стороны многих предметов, что позволяет подняться до обобщения, до теории.

**Идеализация** — мысленное создание абстрактных объектов, обладающих предельными свойствами реального объекта (например, абсолютно твердое тело, идеальный цикл и др.). Идеализация — одна из форм абстракции, но по сравнению с ней еще больше упрощает, схематизирует действительность.

**Экстраполяция** — распространение полученного теоретического положения на неисследованные, но анало-

гичные явления, процессы. Экстраполяция за исходное принимает объективно присущее природе материальное единство. Так, колебательное движение маятника было перенесено на колебания струны, моста, корабля (на волнах). В дальнейшем законы механических колебаний были перенесены на область электромагнитных (колебания напряженностей электрического и магнитного полей в радиоволнах и др.), электроакустических (колебания мембраны телефона, излучателя ультразвука и т. д.), химических и более того — физиологических явлений.

### 3. Схема научного исследования и ее элементы

Технические науки направлены на решение частных задач. Так, в науке о механизации сельскохозяйственного производства обосновываются технологии и системы машин по возделыванию и уборке той или иной культуры, изучаются рабочие процессы машин и устройство рабочих органов, методы расчета узлов и агрегатов, определяются режимы работы и надежность машин и агрегатов, рассчитывается потребность в машинах и необходимых материалах и т. д., т. е. задачи прикладной науки конкретны и таких задач — две.

**Первая задача** — характеризовать явление, процесс с количественной стороны, установив вид и тесноту связи, между изучаемыми объектами. Количественные связи, соотношения между изучаемыми явлениями обычно выражаются формулами, графиками, таблицами. Например, требуется установить зависимость между потребляемой мощностью  $N$  и пропускной способностью комбайна  $q$  типа  $N=N_0+bq$  или взаимосвязь между сопротивлением машины и скоростью ее движения  $R=f(v_p)$ . Такие зависимости нужны для нормирования и других расчетов, в нашем первом примере для выбора двигателя комбайна.

**Вторая задача** — характеризовать явление, процесс не только с количественной, но и с качественной стороны, т. е. выявить и объяснить причины, порождающие те или иные связи. Другими словами, установить сущность явления или процесса.

В современную эпоху наука направляет прогресс и управляет им, а для этого требуется знать сущность яв-

ления, обуславливающую ту или иную зависимость. Знать количественные соотношения часто уже недостаточно. Пусть количественно установлено, что производительность молотилки комбайна зависит от зазора между барабаном и подбарабаньем, диаметра барабана, числа бичей и т. д. Можно опытным путем установить оптимальный зазор, определить оптимальный диаметр, число бичей и т. д. Но из этих соотношений не следует вывод о принципиальных путях совершенствования молотилки, так как мы не узнали принципа обмолачиваемости зерна, процесса отделения его от колоса. А поэтому коренным образом перестроить процесс не можем. Когда мы установили физическую сущность явления: например, обмолот происходит вследствие упругих колебаний отдельных зерен в колосе — вот тогда, используя математический аппарат теории колебаний, можно решать вопросы принципиального совершенствования молотилки.

*Из двух путей решения задач второй, устанавливающий сущность явления, наиболее плодотворен.* Но человек должен принимать решение в каждый данный момент, часто не располагая качественными связями. Поэтому, к сожалению, в науке о механизации сельскохозяйственного производства чаще устанавливаются количественные взаимосвязи на основе эксперимента и опыта вообще.

Научное исследование — творческий процесс, а творчество индивидуально. Каждая наука отличается своими частными методами. Природа многообразна, но у нее много общего, она подчиняется общим закономерностям. Подчиняется им и процесс познания. В наше время в науке широко практикуются всевозможные формализации. Естественно, возникает желание выработать общую схему исследования по проблемам механизации сельскохозяйственного производства. Это позволило бы ускорить научный поиск, сократить продолжительность и углубить исследования. К сожалению, к той или иной схеме каждый исследователь идет самостоятельно, так как в литературе отсутствует изложение подобных схем. Конечно, единой схемы исследования для всех случаев создать нельзя, но для многих из них возможно. По мнению авторов, схема исследования поможет начинающему исследователю, по крайней мере, сэкономить время, предостережет его от

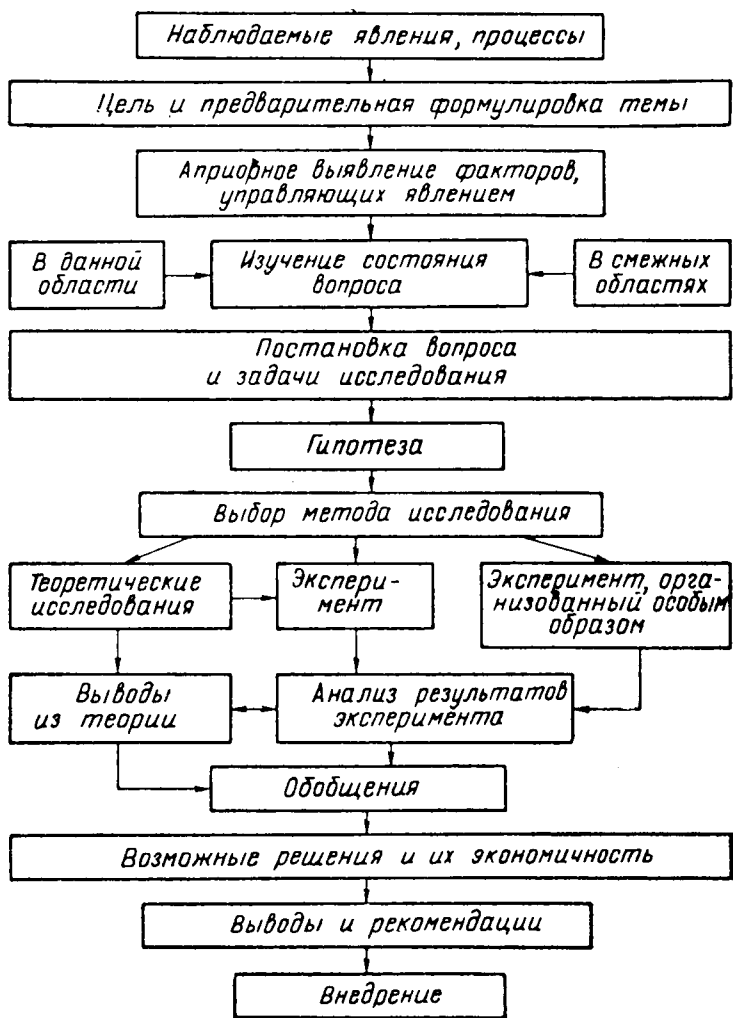


Рис. 1. Общая (примерная) схема исследования:

некоторых ошибок. Приведенная схема (рис. 1) не претендует на всеобщность, исчерпывающую полноту и однозначность.

Исследование начинается с того, что изучающий располагает внешне наблюдаемыми явлениями. Так, на основании учета выполненной работы отмечаются пе-

перасход топлива на гектар, низкое качество вспашки, большие потери урожая при уборке зерновых культур комбайнами и т. д. Возможны личные наблюдения исследователя, но информация может быть почерпнута и из других источников. Все это предшествует исследованию.

Отправляясь от наблюдаемого явления, исследователь стремится совершенствовать тот или иной процесс, машину, технологию и т. д. с тем, чтобы повысить эффективность сельскохозяйственного производства в целом или отдельных его звеньев.

На основе глубокого анализа народного хозяйства общие задачи могут быть поставлены перед исследователем партией и правительством. Примером могут служить специальные постановления.

Наблюдаемые явления могут вызываться многими причинами. Так, перерасход топлива, низкое качество работы, большие потери урожая и т. д. могут происходить вследствие действия нескольких факторов. Конкретно перерасход топлива возможен из-за неисправности отдельных систем и механизмов двигателя, технической неисправности рабочих органов, неправильного комплектования агрегатов и т. д.

А что же прежде всего в нашем примере влияет на перерасход топлива, на что надо воздействовать — это исследователю пока неизвестно, он пока располагает только данными внешних наблюдений. Перед ним же стоит задача познать существо явления, установить внутренние связи с тем, чтобы наметить новые, неизвестные пути. Опираясь на данные наблюдения, исследователь формулирует цель и предварительное название темы исследования.

*Цель должна быть конкретной.* В тех случаях, когда предполагаемый результат исследования улучшает все основные характеристики, цель формулируется в крупном плане — повышение эффективности (например, использования машинно-тракторного парка, транспорта и т. д.). Перечислять в этой формулировке все цели и показатели нет необходимости. Когда улучшается главным образом один показатель, которому отдается предпочтение, только его и указывают. Целью исследования может быть: улучшение качества работы, условий труда, экономия топлива, материала (снижение материалоемкости) и т. д.

*Тема должна быть актуальной.* Это значит, что в теме решаются жизненно важные вопросы, диктуемые практической необходимостью сегодняшнего или завтрашнего дня. Но актуальность темы определяется также предполагаемым производственным эффектом. Поэтому перед началом исследования необходим ориентировочный расчет экономической эффективности. Однако часто такой расчет при создании новой сельскохозяйственной техники, новых технологий провести невозможно из-за отсутствия исходных данных. В этом случае требуется, чтобы тема совпадала с основными направлениями технического прогресса в данной отрасли, являлась бы составной его частью.

#### **4. Изучение состояния вопроса**

Выбрав тему, исследователь знакомится с тем, что известно о ней в изучаемой области знаний и в смежных.

Изучается, анализируется следующее: известные данные; методы исследования (методы совершенствуются, появляются новые); объекты, использованные при исследовании предмета (появились новые объекты, принципиально отличающиеся от старых: гидравлические трансмиссии, широкозахватные сеялки для пропашных культур и т. д.); история исследования предмета, позволяющая охватить его в развитии. Все это делается прежде всего для того, чтобы предотвратить «изобретение велосипеда». Так, у К. Э. Циолковского, например, были большие трудности с получением информации. Поэтому он пишет, что сначала делал открытия, давно известные, потом не так давно, а затем и совсем новые. Это сопровождалось потерей времени и энергии. Знакомство с предметом исключает поспешные выводы и неправильные заключения. Часто все оказывается не так просто или не так сложно, как это кажется на первый взгляд. Знание истории предмета необходимо — оно страхует от дублирования и давно раскритикованных ошибок, а главное, показывает общие тенденции его развития. Знакомство с состоянием вопроса в смежных областях позволяет узнать более общие методы исследования, которые могут быть более совершенными, чем используемые в изучаемой области.



Исследуя автоматическое регулирование частоты вращения барабана молотилки, например, следует прежде всего ознакомиться с теорией автоматического регулирования.

**Источники информации:** литература — книги, статьи, отчеты научно-исследовательских учреждений и др.; практика или личные наблюдения; личные контакты со специалистами, учеными.

По некоторым данным, исследователь не менее  $\frac{1}{4}$  информации черпает из непосредственных контактов со специалистами. Следует стремиться поддерживать старые связи и устанавливать новые на конференциях, в личных встречах. К таким контактам нужно готовиться. Разговор на интересующую тему должен вести (и уметь это делать) заинтересованный исследователь.

**Литературный обзор или реферат** обязателен в каждом исследовании. В нем в письменной форме излагаются результаты ознакомления с предметом. Отметим, что в этом обзоре ссылки на литературные источники обязательны, на свои наблюдения допустимы, на результаты личных контактов не делаются. Последние важны для понимания предмета, определения направления поиска, расширения своего научного кругозора и очень часто для приобретения уверенности в правильном выборе направления исследования и своих действий, что является важнейшим стимулирующим фактором творческого процесса.

Ознакомившись с состоянием дел, исследователь обязан задать себе вопрос: «Почему надо проводить исследования и нельзя воспользоваться известными положениями других исследователей»? На то есть ряд причин.

**Причины, вызывающие необходимость исследования.**

*Появление новых объектов для изучения*, например технологии, машин. Это бывает чаще всего. Например, с поставкой сельскому хозяйству свеклокомбайна КС-6 возникла необходимость в исследовании его технического обслуживания, вписываемости его в технологический процесс и т. д.

*Исследования проведены не в полном объеме.* К примеру, исследовано влияние рабочей скорости на производительность посевного агрегата, а влияние скорости движения на повороте не исследовано, а также не изучалось воздействие на производительность продол-

жительности заправки сеялки, т. е. не охвачены все элементы, влияющие на изучаемый показатель.

*При ранее проведенном исследовании допущены принципиальные исходные ошибки.* Исследовался, например, универсально-пропашной трактор ЛТЗ со всеми ведущими и управляемыми колесами одинакового размера на транспорте.

Схема этого трактора позволяет использовать седельный полуприцеп. Был сделан вывод, что использование его в седельном варианте не дает эффекта по сравнению с работой с обычным полуприцепом. Но грузоподъемность тележки при исследовании была ограничена (4 т), т. е. сильно занижена, что не позволило использовать потенциальные возможности трактора новой схемы. Поэтому при грузоподъемности 8...10 т вывод получился совсем другим.

*Противоречия в литературе или между результатами исследований и практикой.* При переходе от трактора ДТ-54 к ДТ-75 утверждалось, что производительность возрастет на 40%, а через 5 лет оказалось, что она возросла только на 5...6%. Тут есть основания для исследования.

*Ошибка в методе исследования.* Пружинный динамограф В. П. Горячкина (массой около 30 кг) включался между трактором и прицепной машиной для изучения колебаний сопротивления машины, а он сам в ряде случаев и был на 50% источником этих колебаний.

*Отсутствие общих методов решения вопроса.* Так, в 1956 г. была поставлена задача: имеются тракторы разных марок в известных количествах, в данный период необходимо выполнить определенные объемы работ. Ставится задача, как распределить тракторы по работам, чтобы выполнить их в кратчайший срок. Тогда задача не была решена из-за отсутствия общих методов. Разработка же методов линейного программирования позволила ее позже решить.

*Отсутствие требуемой испытательной аппаратуры.*

Положим, на вопрос «почему исследуем» — дан положительный ответ. Задается еще один вопрос: «Если устранить «белые пятна», противоречия, использовать новые методы и т. д., то будет ли достигнута поставленная цель?». При положительном ответе ведут дальнейшие поиски.

После изучения состояния вопроса требуется уточнить тему. Необходимость изучения той или иной темы должна быть аргументирована. Тема должна быть актуальной, конкретной, нацеленной на новое решение.

## **5. Постановка вопроса и задачи исследования**

**Общие положения.** Как уже отмечалось, специалист сельскохозяйственного производства, исследователь наблюдает внешние проявления взаимосвязей, другими словами, внешние факты, «лежащие» на поверхности явлений. Эти внешние проявления наблюдательный, мыслящий (или работающий) специалист легко замечает. К ранее приведенным примерам можно добавить и другие. Одно звено ежегодно получает более высокие урожаи; у отдельных механизаторов мала выработка на трактор и много простоев; на отдельных работах качество неудовлетворительное; часты поломки тех или иных машин; оснащенность техникой растет, а урожай не повышается и т. д. Что нужно сделать, на что воздействовать или, другими словами, как управлять явлением — вот основной вопрос, стоящий перед исследователем. Внешние проявления — это результат действия многих факторов, из которых одни оказывают небольшое влияние, другие большее и, наконец, третьи наиболее существенное. Исследователю важно выявить наиболее существенные факторы, ибо они в основном определяют поведение того или иного объекта, обеспечивают те или иные количественные характеристики и показатели, т. е. внешние проявления, а затем установить взаимосвязь между этими факторами и наблюдаемыми характеристиками.

Исследователь на основании интуиции, выработанной предшествующими наблюдениями, изучением других, в какой-то мере аналогичных явлений, делает предположение о развитии явления о характере взаимосвязей. Но такой подход предполагает большой опыт и значительную эрудицию в исследованиях. Начинаящий исследователь обычно приступает к изучению литературы, посвященной предварительно сформулированной теме, причем изучает литературу не только по данной теме, но и в смежных областях. Это позволяет ему выявить, что уже было изучено, как изучено, что было упущено и почему. После этого он уточняет название темы и определяет предмет исследования.

**Что же такое предмет исследования?** Как уже отмечалось, задача исследования сводится прежде всего к выявлению наиболее существенных факторов, определяющих поведение объекта, и отысканию связей, зависимостей между этими факторами и внешне наблюдаемыми проявлениями (наблюдаемыми характеристиками) непосредственно или косвенно. Так, если замечен перерасход топлива и исследователь на основании собственных знаний и анализа литературных источников предположил, что основным нарушающим фактором служит техническое состояние рабочих органов, а точнее, острота заточки лезвия рабочего органа, то он может искать взаимосвязь между остротой рабочего органа и расходом топлива. Но затраты топлива с остротой рабочих органов связаны косвенно. Следовательно, обнаружить связь между ними трудно, так как на расход топлива влияет ряд других, ранее перечисленных факторов. Поэтому взаимосвязь надо искать между затратами энергии и техническим состоянием рабочих органов. В рассматриваемом примере это будет предметом исследования. Определить между чем и чем следует устанавливать количественную или качественную связь — это значит определить предмет исследования. Другими словами, предмет исследования есть то, что ищет исследователь, — сущность явления и количественные взаимосвязи, отношение между свойствами вещей — то, на что направлена его творческая мысль.

Итак, мы подошли к определению предмета исследования.

**Предмет исследования** — подлежащие выявлению количественные или качественные взаимосвязи, характеризующие взаимное отношение между свойствами изучаемого объекта, взаимосвязь между факторами и показателями, между воздействием и ответной реакцией и т. д. Выявление предмета исследования — очень важный шаг. От того, насколько правильно определен предмет исследования, очень часто зависит успех исследования. При поверхностном взгляде определение предмета исследования не представляет трудности. В действительности установить предмет исследования — задача сложная и начинающему исследователю к этому надо серьезно и продуманно относиться.

Одновременно с предметом исследования определяется и объект исследования.

**Объект исследования** — законченный элемент, выполняющий вполне определенные функции. Им может быть агрегат, машина, узел, производственный процесс (сочетание операций), отдельные операции и др. Что чему должно предшествовать — выбор предмета исследования выбору объекта или наоборот — однозначно сказать нельзя. Если, например, исследователь располагает информацией о том, что ходовая часть гусеничного трактора часто выходит из строя, то тем самым объект исследования определен и надлежит установить предмет исследования. Если известно, что большие затраты труда при возделывании и уборке сахарной свеклы, то вначале надо определить предмет исследования, а затем объект исследования.

**Требования к объекту исследования** включают в себя следующее.

*Типичность*, т. е. объект обладает свойствами, характеристиками, часто встречающимися среди других, имеет достаточно широкое распространение. В зависимости от того, каков объект, типичность относится к агрегату, машине, узлу, процессу, почве и т. д. Исследование вспашки с трактором Т-40 в условиях Центрально-Черноземной зоны явно нетипично, так как на этой работе он занят очень непродолжительное время.

*Перспективность*. Объект применяется не только в то время, когда проводятся исследования, но и будет применяться в ближайшем будущем. В противном случае полученные закономерности не будут использованы. Так, если в настоящее время установить нормы расхода топлива при работе на тракторе ДТ-54, то ими воспользоваться нельзя, так как таких тракторов в хозяйствах почти нет. Правда, могут быть исключения, если выбранный объект используется для теоретических исследований или при проверке общих методов. Но даже в этих случаях объект следует выбирать перспективным.

*Доступность*. Под этим понимается то, что объект доступен для проведения эксперимента, т. е. не требует дорогостоящего оборудования для снятия характеристик, имеется возможность установить испытательную аппаратуру и легко обслуживать ее и т. д.

**Постановка вопроса** — это анализ известного о предполагаемом предмете исследования, выявление причин, определяющих неполноту сведений о нем, и рассмотрение всего этого с позиции достижения цели, далее, это

обобщенные выводы из известного о предмете, в которых обосновывается необходимость выполнения исследования.

Как показывает опыт исследователей, этот этап — один из самых трудных и ответственных. Очень часто «поставить вопрос», т. е. обосновать и конкретизировать предмет исследования, а затем поставить задачи, много труднее, чем решить их. (Решение часто является «делом техники», так как существуют общие методы исследования, можно использовать опыт предшественников, руководителей, помощников.) А главное, после этого этапа известно, что делать.

*Прежде всего конкретизировать цель исследования:* повышение производительности, улучшение качества работ или условий труда и т. д.

*Затем конкретизировать предмет исследования.* Определить, какие явления, процессы, зависимости оно должно охватить. Пусть нам надлежит изучить продолжительность поворота. Мы выяснили, положим, что неизвестна зависимость  $t_{\text{п}} = f(v_{\text{п}})$ , так как не было ранее скоростных агрегатов.

*Отграничить выбранный предмет исследования от примыкающих к нему.* В случае с седельным агрегатом, например, следовало бы остановиться на потенциальных возможностях трактора на транспорте и оставить в стороне использование его на других работах.

*Ограничить круг изучаемых объектов.* Расширение темы обычно ведет к поверхностной трактовке, мало обоснованным выводам. Такое исследование трудно выполнить, так как трудно его спланировать, организовать, обеспечить материально.

Выглядит постановка вопроса приблизительно так (на примере с поворотом агрегата). Повышение рабочих скоростей приводит к уменьшению доли чистого времени в балансе времени смены. Исследования показывают, что на полях с короткими гонами на повороты расходуется 20...25% времени движения, а время поворота зависит от массы и момента инерции агрегата, распределения масс по его опорам, скорости поворота. Однако исследования поворота были проведены с прицепным агрегатом при невысоких (до 5 км/ч) скоростях движения, а с увеличением скорости возможно удлинение траектории поворота, вследствие возрастающих центробежных сил, а значит, и увеличение времени поворота и ширины поворотной полосы. Это особенно заметно при навесном агрегате. Определение оптимальной скорости поворота позволит сократить время поворота и повысить производительность агрегата. Для этого нужно провести специальное исследование.

Наконец, можно сформулировать задачи исследования.

**Задачи исследования** — это перечень тех конкретных взаимосвязей, которые нужно установить и сущность которых нужно раскрыть, и практических выводов, которые нужно сделать на их основе.

Обратим внимание, что эти задачи отличаются от общих задач науки только конкретностью зависимостей и путей реализации результата.

**Требования к задачам исследования** следующие.

*Конкретность задач* (в примере с поворотом: установить зависимость времени поворота от скорости движения; определить оптимальную скорость поворота навесного посевного агрегата).

*Ограничение количества задач* — множество их свидетельствует о неконкретности темы.

*Возможность реализации полученных решений.* Анализ известного, выявление предмета исследования и постановку вопроса оформляют, как отмечалось, в виде литературного обзора или реферата. Отметим, что исследователь пишет его прежде всего для себя, так как письменное изложение много дает исследователю для понимания предмета. С другой стороны, обзор или реферат позволяют другим исследователям ознакомиться с состоянием вопроса и оценить (точнее, высказаться) о правильности направлений научного поиска. Основные требования к изложению: полнота сведений о предмете, систематичность изложения с группировкой материала по отдельным вопросам и анализом его (а не изложение подряд содержания отдельных литературных источников), конкретность и ясность.

## 6. Гипотеза

**Общие положения.** Место гипотезы показано на схеме условно. Однако чаще она предшествует выбору наиболее общих методов. Человек вообще, исследователь в том числе, как правило, не может наблюдать явления, процессы, происходящие внутри изучаемого объекта. Исследователь только может наблюдать и как-то фиксировать внешнее проявление внутренних взаимодействий и взаимосвязей. Пусть, например, необходимо исследовать сущность процесса разрушения пласта

почвы при ее вспашке. Мы можем наблюдать только, как влияет тот или иной фактор (скорость движения, форма рабочего органа и т. д.) на степень разрушения, т. е. наблюдать внешние стороны явления. Или другой пример, что происходит, какова внутренняя сущность обмолота стеблей, что заставляет зерно «покинуть» колос. Опять непосредственно наблюдать этого мы не можем. Но перед исследователем стоит задача уяснить, от чего зависят, чем определяются наблюдаемые явления, т. е. познать сущность явления. Следовательно, он должен предположить, как протекает процесс внутри объекта, какова его сущность и проверить правильность этих предположений. Для этого высказывают гипотезу, которую соответствующим образом проверяют.

*Гипотеза — научное предположение о сущности явления, внешне проявляемой определенным образом, или предположение о виде количественной связи между изучаемыми объектами, между параметрами и характеристиками.*

В последнем случае часто употребляется термин «рабочая гипотеза». В научном познании гипотеза — само предположение, а также особый прием выдвижения и доказательства предположения.

Гипотеза — научное предположение о том, что происходит за пределами опыта. Мы употребляем термин «научное предположение». Это значит, что гипотеза должна отвечать определенным требованиям.

Требования к научным гипотезам включают следующее.

*Согласованность со всем накопленным опытом, со всеми известными фактами, т. е. согласованность с фактической информацией, для объяснения которой гипотеза выдвигается. Следует отметить, что «факт» — это объективное событие, наблюдение. Факты выдвигают и мнимые. Древние считали, что Солнце вращается вокруг Земли и подтверждали это наблюдениями, но они были явно субъективны и ошибочны.*

Придавая активную роль гипотезе, К. А. Тимирязев отмечал, что правильно было бы сказать, что гипотеза должна быть в согласии со всеми известными фактами или быть в состоянии обнаружить несостоятельность того, что неверно признается за факты и находится в противоречии с ней.



*Экспериментальная проверяемость гипотезы.* Наука строится на проверяемых гипотезах. Однако следует иметь в виду, что речь идет о принципиальной возможности проверки. Если на данном отрезке времени нет возможности проверить гипотезу, то это не означает, что она не проверяема.

*Информативность гипотезы* — способность объяснять круг явлений действительности. Иногда это называют универсальностью гипотезы. Чем шире этот круг, тем больше информативность гипотезы, тем она ценнее для науки.

*Простота гипотезы.* Простота означает немногочисленность исходных допущений, выведение следствий из гипотез прямым путем, использование простых средств для ее проверки. Простота гипотезы вытекает из объективной структуры мира, из единства различных явлений, из подчинения их некоторым общим законам. Простота с принципиальной точки зрения, а не с точки зрения вычислений. При простой гипотезе вычисления могут быть сложными. Иногда вместо понятия «простота» употребляется термин «изящность» гипотезы.

*Согласованность гипотезы* с известными законами природы, с установившимися теориями.

*Логичность гипотезы.*

Гипотеза — главный методологический инструмент исследования. Она организует процесс научного поиска, определяет его логику, путь разработки. Гипотеза освещает путь исследования, придает ему целенаправленность. Все ученые единодушны во мнении о необходимости гипотезы. Гипотеза нужна, так как выбор методов, способов и объектов исследования зависит от того, что ищет исследователь, и только имея предварительное решение (а гипотеза и является таким решением), можно определить искомое. Если же выдвинута ошибочная гипотеза, то в процессе исследования, по мере накопления информации, она будет заменена новой, правильной. Первоначальная, ошибочная гипотеза может найти правильную.

Иногда исследователь формулирует для себя гипотезу, еще не приступив к работе, т. е. сначала появляется идея, а затем выбирают предмет и объект исследования. Гипотеза может появиться и после постановки задач. В процессе исследования одни гипотезы отвергают и выдвигают другие.

Считают, что, кроме гипотезы, нужна контргипотеза, так как исследователь может привязаться к одной, «как к единственному ребенку», и потерять объективность.

Нельзя дать готовых рецептов для построения конкретных гипотез, можно назвать лишь общие их черты, проверенные в отдельных науках.

Какая же связь между интуицией и гипотезой? Благодаря интуиции ученые выдвигают те или иные гипотезы. Интуитивные знания преобразуются в гипотезу. Но как это делается, какие функции выполняет интуиция? В науке до сих пор не только однозначного, но и достаточно ясного ответа нет. Часто, а может быть и всегда в основе гипотезы лежит аналогия.

*Гипотеза выступает в трех формах* при исследовании в области механизации сельскохозяйственного производства.

1. Как предположение о сущности явления, о том, что изучаемый процесс можно свести к известному в той или иной теории процессу. Так, например, процесс обмолота зерновых культур сводят к процессу колебания масс, хорошо изученному в теоретической механике. То же самое можно сделать, изучая колебания оператора при работе на тракторе.

2. Как предположение о количественной связи между показателями и параметрами, например о том, что связь между потребной мощностью  $N$  и пропускной способностью  $q$  зерноуборочного комбайна имеет вид

$$N = N_0 + bq,$$

где  $N_0$  и  $b$  — постоянные величины;

или предположение о том, что между массой тракторного прицепа  $M$  и его грузоподъемностью  $Q$  существует зависимость

$$M = M_0 + cQ,$$

где  $M_0$  и  $c$  — величины постоянные.

3. Как предположение о факторах (причинах), определяющих явление, — процесс. Так, например, при изучении удельного сопротивления почвы

$$k = f(\rho, v_p, W \text{ и др.}),$$

где  $\rho$  — плотность почвы;  $v_p$  — скорость движения;  $W$  — влажность почвы.

Гипотезу следует четко формулировать и излагать в письменном виде. Весьма полезно представлять ее в виде предполагаемого графика зависимости или тенденции развития явления. В этом случае гипотезу легче подвергнуть анализу и критике.

**Превращение гипотезы в теорию.** Если гипотеза касалась сущности явлений, то основных путей превращения два.

Из всякой гипотезы вытекают те или иные следствия, с одной стороны. С другой стороны, путем эксперимента или на основании опыта исследователь располагает фактами. Сопоставление фактов со следствием, вытекающим из гипотезы, есть путь превращения гипотезы в теорию. Если при сопоставлении получается большая (достаточная) сходимость, то гипотеза превращается в теорию.

Наиболее эффективный путь проверки гипотезы — предсказание неизвестного на основе гипотезы. Предположение Д. И. Менделеева о периодическом законе элементов оставалось гипотезой, хотя очень много фактов совпадало со следствиями. Был предсказан элемент гелий, место в таблице и его характеристики. Когда же был открыт этот элемент, то гипотеза стала теорией. Эффективность этого пути определяется его объективностью, так как в этом случае предсказывает обычно один исследователь, а открывает — другой.

При изучении сельскохозяйственной техники чаще всего поступают так. Высказывают предположение о том, к какому виду взаимодействия относится изучаемый вопрос. Например, при изучении обмолота зерновых культур предполагают упругие колебания системы, заимствуют математическую модель колебаний с учетом особенностей системы и на основании анализа этих уравнений делают определенные выводы, т. е. устанавливают следствия. Затем проводят эксперимент, в результате которого накапливаются факты. Если факты достаточно близко совпадают со следствиями, то гипотеза верна и она становится теорией.

Если же устанавливают количественные связи, то высказывают предположение о виде зависимости и на основании эксперимента определяют соответствующие коэффициенты в уравнениях. Сопоставляют экспериментальные кривые с теоретическими, определяя между ними меру сходимости. Но если экспериментальные

данные не совпадают с гипотезой или сходимость уравнений теоретических и экспериментальных низка, то гипотезу заменяют.

## **7. Выбор наиболее общего метода исследования**

**Ознакомление с методами.** Выбор наиболее общего метода исследования представляет собой весьма ответственный момент, в значительной степени определяющий успех исследования. Поэтому необходимо прежде всего ознакомиться с основными методами исследования. Поскольку этих методов очень много, начинающий исследователь не может детально изучить их все. Рекомендуется ознакомление с методами разделить на два этапа. Первый этап включает принципиальное ознакомление с методами на основании аналогии поставленной задачи с решенными тем или иным методом и выбор из них наиболее подходящих. Второй этап — более детальное изучение метода, т. е. изучаются не только основные принципы метода, но и техника его применения.

В исследованиях по механизации сельского хозяйства, как представлено на рисунке 1, чаще всего применяется один из трех общих методов: теоретические исследования с последующим их сопоставлением с результатами эксперимента; проведение традиционного или однофакторного эксперимента; эксперимент, организованный особым образом, — многофакторный эксперимент.

Без сомнения наибольший интерес и максимальный эффект достигается при первом подходе. Поэтому к нему и следует стремиться, и, если приходится отступать от него, надо четко сформулировать, чем это вызвано. Во многих случаях на процесс действуют многие факторы, изменяющиеся во времени, и тогда приходится прибегать к эксперименту, чаще к многофакторному.

**Программа исследования.** На данном этапе исследователь должен приступить к решению поставленных задач. Перечень этих задач является основной частью общей программы исследования. В отличие от программы эксперимента (которая рассматривается в главе V) она включает в себя вопросы, относящиеся к исследованию в целом: задачи исследования, перечень объектов (типы, марки и т. д.), характеристики условий

(указание, например, зоны), для которых готовят результаты. Предполагается, что в программе указывается и объем работ, потребность в оборудовании, площадях и т. д. Однако на данном этапе, т. е. при составлении общей программы, вряд ли можно сделать это достаточно точно, но определить их хотя бы ориентировочно не мешает. (Судя по многим исследованиям, обычно этого не делают, а все эти данные сводят в рабочем плане исследования, который затем в отчете об исследовании не фигурирует.)

Часто в отчетах общая программа не выделяется в отдельный пункт отчета, так как предполагается, что она уже освещена в постановке вопроса, конкретизации темы и в задачах исследования.

Когда известно, какие задачи решать, возникает вопрос о том, как их решать, т. е. вопрос об общей методике исследования.

**Методика исследования** — совокупность способов и приемов решения задач исследования. Общая методика относится ко всему исследованию в целом и содержит стержневые, главные способы и приемы, проходящие через все исследование и определяющие его. В каждом исследовании разрабатываются и частные методики проведения отдельных опытов, решения отдельных частных задач, необходимых для решения общих, — они разрабатываются и указываются в соответствующих частях исследования. Например, методика оценки экономического эффекта — в экономической части, методика получения отдельной опытной зависимости — в методике эксперимента (см. главу V) и т. д.

Отметим еще раз, что научный уровень исследования определяется не только предметом исследования, но и его методом. Великий ученый И. П. Павлов, например, говорил, что от метода, от способа действия зависит вся серьезность исследования.

Ориентировочно (так как общее решение дать нельзя) разработку общей методики можно представить следующим образом.

Решают вопрос о теоретическом или экспериментальном направлении исследования. В области механизации сельского хозяйства предпочитают экспериментально-теоретические исследования, хотя часто, к сожалению, по объективным причинам (сложность явлений, отсутствие математического аппарата) или по субъек-

тивным (слабая, например, математическая подготовка) ограничиваются чисто экспериментальными.

Затем определяют (обосновывают) механико-математические методы, которые будут использованы в теоретической части и в экспериментальной (некоторые распространенные общие методы кратко рассмотрены в главе III).

Иногда здесь же решают вопросы частных на первый взгляд методик. Ими определяется ход и результат исследования в целом. Например, решается вопрос о диапазоне скоростей движения исследуемых скоростных агрегатов (в основном они интересуют исследователя), об условиях проведения опытов (лабораторные или полевые) — от этого, как считает исследователь, зависит срок внедрения и т. д. Включение их не противоречит одному условию — они относятся к исследованию в целом, но не нашли, положим, отражения в формулировках задач исследования.

Решив эти вопросы, исследователь составляет схему исследования (развернутую нижнюю часть схемы рисунка 1, от этапа «Выбор метода исследования»).

**Пример** (для краткости без обоснования всех принятых решений; исследуется устойчивость хода по глубине скоростного навесного плуга в зависимости от разных факторов). Мобильные сельскохозяйственные агрегаты работают в условиях внешних воздействий, представляющих собой случайные функции времени (пути), поэтому для решения поставленных задач наиболее подходящи методы статистической динамики (см. глава III, параграф 3), позволяющие в теоретической части достаточно полно учесть характеристики агрегата и реальные условия его работы, оценить колебания глубины пахоты числом.

За критерий оценки устойчивости хода плуга по глубине принята дисперсия глубины пахоты корпусом, дающим наименее равномерную по глубине вспашку.

При анализе используются методы, основанные на известных способах численного интегрирования выражений вида

$$D_a = \int_0^{\infty} y(x)z(x)dx.$$

Функцию  $y(x)$  определяют теоретическим или экспериментальным путем, функцию  $z(x)$  — экспериментальным.

Далее представляют две схемы исследования (при определении  $y(x)$  опытным и экспериментальным путем), определяющие дальнейший ход работ.

**Исходные данные для разработки общей методики** — задачи исследования; гипотезы — они определяют, что

измерять и методы измерений при решении поставленных задач; литературные данные о методах и способах теоретического и экспериментального решения подобных задач (о механико-математических методах, приборах, методах обработки опытных данных и т. д.); материальная база — наличие ЭВМ позволяет моделировать процессы, быстро выполнить сложные расчеты, определяет материально-техническое обеспечение; подготовка исследователя, его субъективные данные (известно, например, что Эдисон предпочитал эксперимент теории); сроки исследования — короткие сроки потребуют использования методов, обеспечивающих выполнение исследования в эти сроки.

**Основные требования к общей методике:** соответствие поставленным задачам (с позиции обеспечения их решения); соответствие современному уровню науки (математики, техники, отрасли); простота, ясность и доступность (с позиции понимания методики и ее использования); возможность использования — метод где-то апробирован, но в сельскохозяйственном производстве в силу специфики (погоды, квалификации персонала и др.) не может быть использован.

## 8. Понятие о теоретических исследованиях

Теоретические исследования, как отмечалось ранее, при изучении вопросов механизации сельского хозяйства направлены на то, чтобы свести поставленную задачу к более общей, изученной в фундаментальных или общих науках. Это дает возможность воспользоваться механико-математическим аппаратом этих наук.

Теоретические исследования не только подтверждаются экспериментом, не только утверждаются им, как таковые, но в значительной степени направляют по правильному пути эксперимент, дают возможность исследователю не слепо, а сознательно выбрать наиболее существенные факторы.

*Теоретическое исследование — это разработка гипотезы, доведение ее до предполагаемых зависимостей и, наконец, до математической модели.* Важный элемент теоретического исследования — уточнение терминов и понятий, так как не все они точны и часто по-разному понимаются в различных отраслях знаний.

Судя по определению теоретических разработок, они не только являются аналитическим (формульным) ре-

шением вопроса, но в ряде случаев выступают и как чисто логические рассуждения, однако все они представляют этап абстрактного мышления и предполагают абстрагирование, а точнее идеализацию явления, выделение и рассмотрение главных факторов и взаимосвязей, выведение общих закономерностей и пренебрежение второстепенными.

*Идеализация явления* — первый и важнейший шаг теоретического исследования. Способность к идеализации явления, т. е. к выявлению главного, «основного» звена, и отвлечение хотя бы на время от второстепенных — основное качество исследователя (и любого хорошего специалиста).

При теоретических разработках прибегают как к дедуктивному, так и индуктивному методу. Дедуктивный — такой метод познания, при котором движутся от общего к частному. При этом, изучая конкретные явления, отправляются от общих научных положений и закономерностей.

При использовании индуктивного метода движение в познании идет от частного к общему, когда на основании знания о части предметов того или иного класса делают заключение о классе в целом. Дедукция и индукция не исключают друг друга, а дополняют. Конечно, дедуктивный метод плодотворнее, но, к сожалению, в механизации сельского хозяйства чаще прибегают к индуктивному. При этом, как указывал академик В. П. Горячкин, собирают большой экспериментальный материал в надежде на то, что из него со временем можно разработать теорию. Но проходит время и экспериментальный материал, часто полученный с большой затратой труда и средств, стареет, теряя ценность, а теории из него создать нельзя, так как этот материал собирался без четкой формулировки задач и часто не по единой системе.

Возникает вопрос о том, что выполнено раньше: выбор метода теоретического исследования или идеализация явления. Скорее всего, эти две задачи решаются одновременно, переплетаются одна с другой. Даже можно сказать, что в хорошем исследовании явление и метод постепенно «подгоняются» один к другому. Здесь очень плодотворно сотрудничество инженера, знающего явление, умеющего его идеализировать (упрощать), и математика, владеющего методом.



Итак, нашу конкретную задачу мы свели к общей, изученной в фундаментальных науках. Теперь мы можем составить математическую модель.

**Математическая модель.** В настоящее время полагают, что из всех методов исследования наиболее широко в науке распространено моделирование. Модель в основном, главном, похожа на объект, а деталями (мелочами) они различаются. Идеализируя явление, мы выделяем это главное и закладываем в модель, которую затем изучаем. В теоретических исследованиях рассматриваются чаще всего математические модели.

*Математическая модель — система уравнений, описывающих поведение идеализированного объекта.* Она связывает между собой входные воздействия (силы, температуры и т. д.), параметры объекта (массы, жесткости, сопротивления и т. д.) и выходные показатели (перемещения, ускорения, затраты энергии и т. д.). Часто они связывают между собой ряд факторов, определяющих объект. Очевидно, что неидеализированный объект, с его многочисленными взаимосвязями главных и второстепенных факторов, удобозримой и решаемой системой уравнений представить крайне трудно (если вообще возможно), поэтому наука практически всегда имеет дело с моделью. После установления главных взаимосвязей второстепенные можно учесть поправками.

Разработан ряд механико-математических методов, упрощающих создание математических моделей и их анализ (методы физики, теоретической механики, теплотехники и др.), а для решения некоторых важных, часто встречающихся задач предложены общие математические модели этих задач или соответствующих им явлений, которые в частных случаях в той или иной мере уточняют (модель системы массового обслуживания, модель динамической системы в виде уравнений Лагранжа, модель задачи наилучшего использования ресурса и т. п.). Они кратко рассмотрены в главе III.

Учитывая изложенное, исследователь часто при разработке математической модели и ее анализе идет следующим путем:

формулирует задачу, которую нужно решить теоретически;

определяет, к какому классу задач она относится (некоторые классы задач приведены в главе III);

определяет, каким общим методом ее можно решить;

овладевает методом;  
решает задачу.

Математических моделей одного и того же явления может быть несколько. Вид модели зависит от ряда факторов: практической задачи, сложности явления, взглядов исследователя и т. д.

*Два подхода* к составлению математической модели можно выделить: познавательный и описательный (так же разделяются и модели). В первом выясняется сущность явления, во втором — чисто количественные взаимосвязи (второй преобладает при исследовании сложных явлений).

Математические модели (познавательные и описательные) следует разделить на динамические и статистические модели.

*В динамических моделях* значения функции точно определяются значением аргументов, в них используется аппарат дифференциальных уравнений. Эти модели получаются с использованием методов и законов классических наук, методов аналогии и линейного программирования и т. п.

*В статистических моделях* некоторые параметры заданы с какой-то степенью вероятности. При разработке этих моделей и их использовании в основу положена теория вероятностей и ее отрасли: общая теория вероятностей, теория случайных функций (и ее прикладной метод — статистическая динамика), статистическое моделирование, теория массового обслуживания, теория планирования эксперимента и т. п.

Обе модели в настоящее время одинаково широко используются при исследованиях в области механизации сельскохозяйственного производства. В связи с этим все большее внимание при подготовке специалистов уделяется теории вероятностей, хотя усвоение ее и затруднено, так как требует развитого абстрактного мышления (наличие которого, кстати, является необходимой чертой хорошего специалиста, отличающей его от большинства практиков).

Значение математической модели велико, но не следует переоценивать его. В свое время академик А. Н. Крылов привел сравнение роли математики в исследованиях с работой жернова на мельнице. Качество муки зависит и от засыпанного зерна, и от работы жернова. Жернов может и при хорошей «засыпке» дать

плохую муку, но при плохой «засыпке» (как бы ни был хорош жернов) получить хорошую муку нельзя.

**Требования к математической модели следующие:**

модель должна по возможности точно описывать объект, быть содержательной, хорошо объяснять множество уже известных фактов;

она должна предсказывать новые явления и в какой-то мере их развитие, выдвигать новые проблемы, которые ранее сформулировать не представлялось возможным;

модель должна быть простой, т. е. доступной для понимания, с небольшим числом допущений, оговорок, ограничений;

она должна быть изящной, т. е. иметь краткое аналитическое выражение, быть негромоздкой, ясной.

Математические модели предпочтительнее строить в виде дифференциальных, а не интегральных уравнений. В дифференциальном виде лучше понимается сущность явления. Это, конечно, не значит, что математическая модель не может задаваться в интегральной форме.

Возникает естественный вопрос: отличается ли гипотеза от математической модели, и если да, то чем? Гипотеза, как отмечалось ранее, есть научное предположение о сущности явления, процесса, предположение о главном. Если гипотеза ошибочна, то она заменяется новой, и так до тех пор, пока не будет найдена правильная. Но в конечном счете правильная гипотеза всегда одна, и, если она представлена в математической форме при известных входящих в нее константах, она становится законом. Тогда чем же отличается закон от математической модели? Математических моделей, описывающих данное явление, может быть несколько, и каждая из них имеет право на самостоятельное существование, и одна не исключает существование других. Математическая модель только приближается (разумеется, разные модели с различной степенью точности) к закону. В таком случае математическое описание не есть установление законов, а суть создания моделей с ослабленными требованиями.

**Пример теоретической разработки.** Классическим примером теоретического решения вопроса, доведения гипотезы до математической модели, является решение академиком В. П. Горячкиным задачи о сопротивлении

плуга. При этом использован метод аналогии (см. главу III, параграф 11) и законы механики.

Идеализируя явление, В. П. Горячкин выделил следующее.

*Мертвое сопротивление*  $R_1$  — сопротивление трения плуга о дно борозды, перекатывания колес и т. п. по аналогии с определением силы трения в физике, механике

$$R_1 = G_{\text{п}} f,$$

где  $G_{\text{п}}$  — масса плуга;  $f$  — коэффициент, аналогичный коэффициентам трения.

*Сопротивление деформации пласта*  $R_2$ , по аналогии с зависимостями в сопротивлении пропорциональное площади напряженного сечения и не зависящее от скорости движения:

$$R_2 = k' ab,$$

где  $a$  и  $b$  — глубина и ширина обработки (сечение пласта — площадь напряженного сечения);  $k'$  — коэффициент, аналогичный напряжению ( $\sigma$ ,  $\tau$  и др.).

*Силу*  $R_3$ , *необходимую для сообщения кинетической энергии на пути*  $s$  *частицам пласта*, по аналогии с законами механики пропорциональную массе и скорости  $v$ :

$$R_3 = \frac{mv^2}{2s},$$

где  $m = \gamma abv/g$  — масса, отброшенная за 1 с;  $\gamma$  — плотность почвы;  $g$  — ускорение свободного падения;  $v$  — скорость движения, или путь  $s$ , пройденный за 1 с.

Отсюда 
$$R_3 = \frac{\gamma abv}{g} \cdot \frac{v^2}{2v} = \epsilon abv^2.$$

Как видим, выделены основные факторы: масса плуга  $G_{\text{п}}$ , сечение пласта  $ab$ , скорость движения  $v$ , свойства почвы  $\epsilon$  и  $k'$ .

*Идеализируя явление*, В. П. Горячкин пренебрег трением почвы о корпус, работой резания лезвием лемеха, разной скоростью полета частиц почвы, зависимостью сопротивления деформации  $R_2$  от скорости деформации, так как  $\sigma = f(v)$  и  $k' = \psi(v)$ , различием коэффициентов трения качения (для колес) и скольжения (для лезвий лемехов), отличием реакции на опорах плуга при работе от его веса и т. д.

В результате была получена *рациональная*, т. е. име-

ющая физический смысл и раскрывающая сущность явления, формула.

А если все факторы считать главными? Тогда в дебрях громоздкой формулы затерялся бы физический смысл, универсальная формула, описывающая сопротивление движению деформатора в деформируемой среде (самолета в воздухе, винта в воде и т. д.), превратилась бы в частную, относящуюся только к сопротивлению плуга.

**Значение теоретических разработок.** Теоретические разработки позволяют раскрыть и объяснить сущность явления или зависимости на основании известных законов, т. е. позволяют ответить на вопрос, почему это так, а не иначе, почему и как, например, увеличивается сопротивление плуга с возрастанием скорости движения.

Решение в общем виде позволяет получить решение сразу нескольких подобных задач, например, о движении разных деформаторов в деформируемой среде.

Теоретические разработки повышают надежность научного знания, позволяют, как правило, решить задачу с меньшими затратами труда и средств. Эмпирические обобщения подтверждаются теми фактами, которые имеют к ним отношение. Включенные в теорию, эти обобщения подтверждаются следствиями из других законов и гипотез.

Велика роль теоретических разработок в постановке эксперимента. Академик Н. П. Бусленко, к примеру, пишет: «Математическая модель становится неотъемлемым элементом исследования, без построения которой невозможно осуществить планирование эксперимента, его проведение и обработку результатов» [78, предисловие редактора русского издания].

Кроме того, теория систематизирует (объединяет знания о явлении в систему), расширяет, углубляет и уточняет научное знание, повышает уровень его объективности (в теории как бы очищаются и исправляются отдельные гипотезы, некоторые из них превращаются в законы; теория связывает ряд гипотез и фактов в единую систему, что повышает достоверность, а значит, и объективность знания).

Далее, теория способствует переходу от абстрактного (или общего знания) к конкретному (иначе говоря, от общей формулы сопротивления плуга к сопротивлению конкретного плуга в конкретных условиях).

## 9. Сущность эксперимента

**Эксперимент** — научно поставленный опыт. Научность определяется обоснованностью его постановки, программы и методики, с позиции решения задач исследования, гипотезы и теории и соответствием эксперимента определенным требованиям. Эксперимент — исследование явлений, процессов, сопровождающееся искусственным изменением условий, воздействий, параметров. Экспериментатор по заранее составленному плану изменяет воздействия и условия, или выбирает нужные из них. Без активной роли исследователя эксперимент становится наблюдением. Такие изменения, исходя из теории, гипотез, заранее обосновывают, для чего составляют программы, методики. Одновременно с этим фиксируют определенным образом результаты этих воздействий, а условия проведения контролируют. В этом особенность и ограниченность эксперимента, так как реальные условия, фактические воздействия всегда будут отличаться от условий эксперимента. Но в этом и сила его, поскольку искусственно можно задавать разнообразные воздействия и наблюдать результат этих воздействий.

Всегда ли теоретические разработки должны предшествовать эксперименту — такой вопрос часто возникает у начинающего исследователя. Как видно из представленной схемы (рис. 1), не всегда. Если изучается новый вопрос, если наблюдается очень сложное явление, где одновременно во взаимосочетаниях действует несколько факторов, или, наконец, когда нужно установить только количественные взаимосвязи, использовать которые предполагается непродолжительное время, да и часто в небольших масштабах, то теоретические разработки не обязательно должны предшествовать эксперименту.

(Программа и методика экспериментального исследования подробно рассмотрены в главе V.)

Значение эксперимента в исследовании очень велико. Он выступает в роли обязательного «пробного камня» для гипотез, теорий, предположений и т. д. во всех прикладных исследованиях.

**Функции эксперимента** в исследовании таковы:

отделение существенных факторов от несущественных (факторный эксперимент). В этом случае экспери-

мент аналогичен теории, где тоже выделяются существенные факторы. Но в опыте создается обычно искусственная среда, позволяющая анализировать явление в этих условиях, и теория предшествует эксперименту;

проверка гипотез и теорий;

поиск данных для построения гипотез или уточнения догадок (поисковый эксперимент);

установление количественных соотношений между факторами, определяющими явление.

**Требования к эксперименту:** воспроизводимость, наличие контроля, достоверность.

*Воспроизводимость* означает возможность повторения эксперимента в тех же условиях другими исследователями с получением результата, отклоняющегося от ранее полученного в пределах его известной ошибки и надежности.

Всегда ли можно воспроизвести эксперимент в исследованиях по механизации сельского хозяйства? Нет, не всегда. Можно воспроизвести только лабораторный эксперимент, да и то с известной натяжкой; полевой эксперимент часто нельзя повторить, так как трудно найти одинаковые условия опыта по фону, влажности и типу почвы, температуре и т. д. Отсюда часто исходит разноречивость в результатах исследований, особенно когда авторы не дают характеристик этих условий или указывают их слишком общими (например, в условиях Центрально-Черноземной зоны). Поэтому методика эксперимента должна предусматривать определение характеристик условий опытов.

*Наличие контроля* предполагает, что новые явления и воздействия будут воспроизводиться одновременно с явлениями и воздействиями уже известными, изученными, установившимися в одинаковых условиях. Часто слово «эксперимент» употребляют не совсем верно, потому что отсутствует контроль. Так, вводится новая форма, например, технического обслуживания сельскохозяйственной техники в каком-нибудь районе, и эксперимент предполагает контроль, т. е. наличие технического обслуживания по старой форме в тех же условиях, что и при новой форме. Строго говоря, в этом случае пользоваться понятием «эксперимент» не следует.

Или другой пример. Испытываются тракторы двух типов, выполненные по разным компоновочным схемам. Эксперимент предполагает, что в одно и то же время,

В тех же почвенных и климатических условиях будут испытаны новые схемы, а за контроль взяты тракторы, находящиеся в массовом производстве, характеристики которых известны.

**Достоверность** — неотъемлемая черта эксперимента. Замеряемые величины нестабильны, они варьируют. Поэтому малое число опытов и замеров приведет к ошибке. Но при большом числе опытов можно получить ненадежный, ошибочный результат, если обработать результат неправильно. Для получения достоверных, надежных результатов надо провести необходимое число опытов, а результаты обработать методами математической статистики с использованием теории ошибок. Не может быть речи о достоверности эксперимента, если он не продуман, не обоснован всесторонне.

## 10. Обработка опытных данных и анализ решений

В ходе обработки опытных данных исключают промахи, определяют средние значения, дисперсии, коэффициенты вариации и другие характеристики измеренных величин; устанавливают вид зависимостей и определяют коэффициенты в них, находят оптимальные значения параметров и выполняют ряд других действий.

После обработки опытных данных анализируют полученные решения.

**Анализ** также очень ответственный период. К сожалению, начинающие исследователи не придают ему должного значения. Способы и пути анализа разнообразны. Это прежде всего сравнение полученных решений с теоретическими предпосылками (гипотезой) и отыскание меры сходимости между ними. Это сравнение полученных решений с другими аналогичными решениями не только в данной области, но и в смежных; это и оценка с позиций здравого смысла с учетом повседневной практики.

При анализе важно не только получить экстремальное значение функции, но и проследить ее поведение в областях, прилегающих к оптимальному значению критерия. Если изменения функции в названных областях незначительны, то представляется возможность выбирать значения критерия оптимальности с учетом других показателей, а иногда и заменить критерий. Например, при определении срока службы сельскохозяйственной техники удельные приведенные затраты средств в ин-



тервале 4...6 лет изменяются незначительно — целесообразно принять во внимание затраты труда при ремонте машин.

Если получены аналитические зависимости, то важно объяснить поведение функции, руководствуясь сущностью явления — физической, технической, экономической. Положим, мы изучаем изменения затрат топлива на единицу выполненной работы в зависимости от «возраста» трактора. Необходимо в этом случае не только установить соответствующие зависимости, но и сопоставить их с мощностными характеристиками трактора.

Как было ранее отмечено, иногда приходится прибегать к одно- или многофакторному эксперименту без теории. В этом случае важно попытаться полученные аналитические зависимости свести к рациональному виду, т. е. к виду, аналогичному полученному на основе общих законов. Например, при изучении сопротивления среды — к рациональной формуле В. П. Горячкина:

При анализе важно не только установить достоверность полученных зависимостей, но и определить границы теоретической и фактической их применимости. Дело в том, что в теоретических исследованиях делают ряд допущений, эксперименты проводят в определенных условиях, статистической обработке подвергают какой-нибудь определенный материал, и поэтому нельзя распространять решения беспредельно, надо установить диапазон их распространения.

Для анализа зависимости следует представлять в виде графиков пути, скорости и ускорения. Это позволит изучаемое явление сопоставить с общей схемой и определить характерные точки развития явлений. Следует также определить изменение критерия в зависимости от параметра при разном значении фактора, которому придают различные конкретные значения. Если, например, изучают износ деталей поршневой группы в зависимости от температуры цилиндров при разной степени загрузки двигателя, то можно и нужно выявить, сохраняется ли закономерность износа (или тенденция) при разной загрузке. Более того, можно установить наименьшее значение износа в зависимости от степени загрузки.

**Теоретические обобщения.** Иногда проведенное исследование вместе с ранее полученными или известными данными позволяет сделать теоретические обобщения,

т. е. получить закономерности, распространяемые на более широкий круг явлений или объектов по сравнению с тем, который охватывал предмет исследования. Академик В. П. Горячкин в результате экспериментально-теоретического исследования получил формулу сопротивления плуга, а теоретические обобщения позволили распространить ее на сопротивление движению деформаторов в деформируемой среде: самолета в воздухе, винта в воде и т. д.

Часто исследователь путем обобщений делает выводы о применимости того или иного метода к кругу задач, более широкому, чем решались в исследовании.

Однако в большинстве случаев теоретические обобщения (и обобщения вообще) в современных прикладных исследованиях теряются как отдельный этап исследования, исследователь старается, выполнив такие обобщения, отразить их в формулировке темы (т. е. расширить предмет исследования) после завершения исследования. В этом случае обобщения являются просто элементом теоретической части работы. Такой подход в целом не следует считать правильным. Он ориентирует на неопределенность предмета исследования в процессе его выполнения. С другой стороны, без такого изменения формулировки тема (особенно диссертационная) не несет в себе полной информации о содержании работы. Обычно выбирают меньшее из двух зол.

## **11. Экономическая эффективность исследования**

Для оценки степени достижения цели исследования определяют эффективность тех или иных рекомендаций, предложений.

Методы и техника этих расчетов представляются сложными, а часто и спорными. Разработаны некоторые стандартные (общие для отрасли) методы экономической оценки, ими прежде всего и надо пользоваться (например, расчет экономической эффективности новой техники). Эти методы не лишены недостатков, но они уже опробованы, уточнены и позволяют во многих случаях сопоставить эффективность разных технологий, типов машин и др., одинаково учитывая и влияющие факторы и степень их влияния. Следует оценить пригодность этих стандартных методик для конкретно решаемой задачи. Если нет готовой методики оценки, ее следует разработать с участием экономистов. При этом оценку можно

проводить по ряду показателей: приведенным затратам средств, производительности труда, материалоемкости, фондоотдаче, расходу дефицитных материалов (например, топлива) и т. д. Если представляется возможным свести все показатели к одному, то легко выбрать решение. Когда этого сделать нельзя, следует принимать компромиссные решения.

Нужно обращать внимание на два момента, ускользающие иногда от исследователя.

*Экономический эффект следует рассматривать с позиции всего народного хозяйства страны, а не только данной отрасли.* Используя новый рекомендуемый материал, можно не получить экономии при изготовлении машины, но иметь большой эффект при ее эксплуатации: работе, ремонте, техническом обслуживании. Например, установка подшипников одноразовой смазки заводу-изготовителю не дала экономии, но большая экономия средств получается при эксплуатации машин.

*Наряду с экономическим есть и другие эффекты.* Например, красивая окраска тракторов дает эстетический эффект, который трудно, а иногда невозможно оценить в рублях. Но такой эстетический, эргономический и другой эффект следует указать.

Различают предварительную и окончательную оценку экономической эффективности исследования. Первая, очень приближенная, выполняется на этапах выбора предмета исследования и его конкретизации по ориентировочным или литературным данным. Вторая — после окончания анализа результатов исследования.

Отметим, что во многих исследованиях с целью получения данных для экономической оценки приходится ставить специальные опыты (это учитывается программой и методикой эксперимента). Например, исследуется влияние угла наклона линии тяги (силы тяги) на сопротивление плуга. В специальных опытах или путем измерения дополнительных величин будет определяться влияние его на производительность агрегата или расход топлива.

## 12. Выводы и внедрение

На основании всех данных исследования делают выводы и дают рекомендации.

**Выводы** — краткое изложение полученных результатов. Они включают в себя следующее:

*ответы* на поставленные в исследовании основные задачи; в примере с поворотом это выглядит так: зависимость времени поворота от скорости движения посевного агрегата МТЗ-82+СКНК-8 в конкретных условиях имеет вид параболы с минимумом в диапазоне рабочих скоростей;

*ответы* на важные, с точки зрения исследователя (а не на все), решенные дополнительные вопросы; это может быть вывод о применимости того или иного метода исследования, о влиянии дополнительных факторов, о безопасности работы людей, надежности машин и т. д.; в указанном примере будет так: скорость поворота рулевого колеса при рабочих скоростях движения и нормальной работе водителя не влияет на время поворота.

Выводы по этим двум пунктам носят в основном научный характер:

*результаты*, которые могут быть использованы на практике; в примере: оптимальная скорость поворота исследуемого посевного агрегата находится в пределах 5...6 км/ч;

*результаты* оценки экономической эффективности; в примере: выполнение поворотов с оптимальной скоростью (такого-то агрегата, в таких-то условиях) сокращает время поворота на 30% и повышает производительность агрегата на 7%;

*данные* о месте, объеме и эффективности внедрения результатов, с указанием подтверждающего это документа, и указания о том, где еще (в какой отрасли, на каком предприятии) целесообразно внедрение (или использование) и в каком виде (методика расчета, методы исследования, оптимальные параметры объекта, конструкция и т. д.);

*указание* о дальнейших направлениях исследований и ожидаемых результатах.

**Основные требования к выводам** — включение только новых данных по теме, побочным вопросам и вопросам практического значения; тщательность и конкретность, краткость формулировки, без перегрузки числами, указанием причин и объяснением фактов; немногочисленность (только самое важное); обоснованность, причем о том, что не исследовалось, а появилось в виде догадки, говорить нет смысла.

**Рекомендация** — совет, указание, вытекающие из исследования, о внесении изменений в практику. В при-

мере с поворотом — указание оптимальной скорости поворота.

**Внедрение** — фактическое использование результатов исследования на практике. Это, пожалуй, один из труднейших этапов, определяющих результативность исследования. Его пока считают самым слабым звеном в системе наука — производство.

Внедрение требует от исследователя не только знаний, но и организаторских способностей, умения работать с людьми, настойчивости. Большие и обоснованные надежды возлагаются на решение этого вопроса путем создания научно-исследовательских объединений (типа институт — КБ — завод).

Формы внедрения определяются прежде всего типом разработок. Так, если разработки касаются новой машины, то принят следующий порядок внедрения.

Министерство сельского хозяйства СССР является заказчиком, а промышленные министерства, в первую очередь Министерство тракторного и сельскохозяйственного машиностроения, а также Министерство машиностроения для животноводства и кормопроизводства — подрядчиком. Заказчик должен знать какие по назначению, принципу действия и с какими параметрами машины ему нужны. Применительно к сельскохозяйственной технике разрабатывают так называемые, агрозоотехнические требования. В них указывают: тип машины, рабочие органы, основные параметры (ширина захвата, скорость движения, грузоподъемность и т. д.), основные показатели работы и некоторые другие характеристики. Естественно, возникает вопрос, как предусмотреть будущую машину? Решить, не только какой она должна быть по принципиальной схеме, но и с какими параметрами. Ведь использовать машину только предшествующей конструкции, находящуюся на производстве, т. е. создать новую по ее подобию, недостаточно, ибо тогда техника не будет совершенствоваться. Умозрительно прийти к новой машине тоже нельзя. Кто же и как разрабатывает требования к будущей машине?

*Будущая машина первоначально в виде идеи возникает у ученого-конструктора или практика. Большое значение в возникновении идеи имеет интуиция как результат изучения предшествующего и передового опыта, а также литературы; заимствование лучших образцов из смежных отраслей.*

Итак, возникла идея новой машины, новой технологии.

*Проверка идеи путем воплощения ее в действующий макет* будет следующим этапом. При воплощении идеи в макет возникает много вопросов, ответить на которые можно только дополнительными исследованиями как теоретическими, так и экспериментальными.

Сконструированный и изготовленный макет машины испытывают и с учетом результатов этих испытаний разрабатывают требования к машине, если, конечно, результаты испытаний были положительными. Такие испытания называются ведомственными. Процесс доработки на основании испытания часто длится долго.

В нашей стране к разработке конструкции (а не макета) и новой машины приступают только после того, как эта машина внесена в так называемую Систему машин.

*Система машин* для комплексной механизации сельскохозяйственного производства разрабатывается на соответствующее пятилетие и десятилетие, т. е. на тот отрезок времени, на который ведется планирование всего народного хозяйства. Итак, чтобы началась разработка конструкции новой машины, необходимо ее внести в Систему машин. Поэтому по результатам испытания макета вносят будущую машину в Систему машин. Для формирования Системы машин создана ведомственная комиссия, состоящая из представителей Министерства сельского хозяйства СССР, Госкомсельхозтехники СССР и министерств промышленности.

С учетом технологии того или иного процесса, условий работы и экономической целесообразности, возможности технического выполнения и ресурсов промышленного производства, а также возможности и целесообразности использования и ремонта в Систему машин вносят ту или иную машину. После этого министерство промышленности дает задание соответствующему заводу или конструкторскому бюро разработать конструкцию и изготовить экспериментальный образец машины.

*Экспериментальные образцы* изготавливают небольшими сериями (от трех до десяти машин). После чего заводом-изготовителем или на хоздоговорных началах вузами и машиноиспытательными станциями проводят ведомственные испытания образцов.

В задачу ведомственных испытаний входит: проверить прежде всего работоспособность и установить показатели надежности экспериментальной машины, определить ее технико-экономические показатели, разработать инструкцию по эксплуатации и подготовить машину к государственным испытаниям.

Конечно, с «одного захода» подготовить машину к государственным испытаниям, как правило, не удастся. Машину дорабатывают, доводят до нужного состояния. Доводка — длительный и неоднократный процесс. В процессе доводки изменяют конструкцию отдельных механизмов, агрегатов, подбирают лучшие материалы, совершенствуют и вновь проводят испытания. После того как машина на ведомственных испытаниях покажет хорошие результаты, ее передают на государственные испытания машиноиспытательным станциям, подчиненным Госкомсельхозтехнике СССР.

Машиноиспытательные станции, с одной стороны, располагают агрозоотехническими требованиями на машину, а с другой — экспериментальным образцом машины. Испытания проводят по заранее разработанным и утвержденным методикам. Результаты испытаний сопоставляют с агрозоотехническими требованиями и выносят решение о пригодности машины, т. е. определяют: поставить ее в серийное производство, доработать конструкцию в соответствии с выявленными недостатками или прекратить работу из-за бесперспективности конструкции.

Поскольку сеть машиноиспытательных станций распределена по различным зонам страны, отличающимся почвенно-климатическими условиями, заключения машиноиспытательных станций могут быть неодинаковыми. Окончательная судьба машины определяется решением объединенного научно-технического совета, в состав которого входят представители МСХ СССР, Госкомсельхозтехники СССР и промышленных министерств. Машина может выпускаться только для одной или нескольких зон, в которых при испытаниях она себя положительно зарекомендовала. Помимо полного завершения внедрения новой машины, в котором участвуют многие, может быть и поэтапное внедрение. При этом тот или иной исследователь принимает участие только в отдельных этапах. Так, разработка и испытания макета с целью включения его в Систему машин и разработка

агрозоотехнических требований также считается внедрением.

*Утверждение документов* научно-техническим советом считается внедрением. Разработанные операционная технология, рекомендации по техническому обслуживанию техники, новые методы определения параметров технологии (например, равномерности посева), предельные значения параметров, рекомендации по лучшему использованию техники в зависимости от масштаба внедрения и ведомственной принадлежности рекомендации рассматривает и утверждает научно-технический совет (НТС) соответствующего уровня. Так, если рекомендации могут быть распространены на все зоны страны, то их рассматривает НТС МСХ СССР, если только на республику, то — НТС МСХ республики. Если разработки касаются ремонта машин в специализированных мастерских, то их рассматривает НТС Госкомсельхозтехники СССР. Рекомендации могут быть рассмотрены НТС области или края. Более того, разработка рекомендаций и использование их в регионе и даже в отдельном хозяйстве также является внедрением.

*Опубликование результатов исследований* — простейшая форма внедрения. Публикация возможна в журналах, книгах, депонированием в информационных журналах, к ним приравниваются авторские свидетельства и др.

*Включение в учебные курсы* (в учебные дисциплины) — важный шаг в реализации теоретических работ.

Исследователь лучше других знает особенности, тонкости разработок; он должен быть активным участником внедрения на всех стадиях: подготовки к внедрению, собственно внедрения (монтаж конструкции и испытание на рабочем месте, изготовление образцов, подготовка людей, оформление документации и т. д.) и завершении внедрения (испытания в производственных условиях, определение показателей работы и т. д.).

По истечении определенного срока проверяют экономическую эффективность внедренных исследований, выявляют сильные и слабые стороны предложенных разработок.

К рассмотренной главе рекомендуется следующая литература: [10, 12, 18, 25, 32, 39, 61, 63].



## Глава II

# Организация работы исследователя

### 1. Личная работа исследователя

Научное творчество — исключительно сложный вид человеческой деятельности. Академик В. А. Энгельгардт отмечал, что в труде ученого много «упорной, длительной, часто однообразной работы, разочарований, обманутых надежд и ожиданий, непрерывного преодоления трудностей и неожиданных препятствий, возникающих одно за другим»\*. К этому нужно добавить, что все это перемежается кратковременными вспышками большого морального и творческого удовлетворения. Деятельность в таких условиях возможна только при высоком уровне организованности исследователя.

Получив хорошую профессиональную подготовку, специалист не всегда знает, как организовать свой труд, и руководствуется обычно здравым смыслом и традицией.

Последовательность выполнения работ изложена в главе I; для успешного их проведения и в установленные сроки необходимо прежде всего составить план всего объема работ. При этом молодые исследователи часто спешат начать эксперимент, не уделяя должного внимания предшествующей эксперименту части исследований.

**Творческий подход** — основной принцип организации научного труда. Отличительная черта этого метода — усиленная работа мысли. Первая обязанность научного работника думать критически, т. е. сопоставлять явления, наблюдения и выводы о них; наблюдать и анализировать; сомневаться и утверждать. Китайская посло-

---

\* Энгельгардт В. А. Еще о научном поиске. — Наука и жизнь, 1969, № 10 с. 69.

вица утверждает: «Ты можешь стать умным тремя путями: путем опыта — это самый горький путь; путем подражания — это самый легкий; путем размышления — это самый благородный путь».

Решающее значение мысли отмечали крупнейшие ученые мира. Исаак Ньютон на вопрос о том, как он делал свои открытия, отвечал: «Я все время думал о них»\*. Дарвин считал одним из качеств, обеспечивающих ему успех, «безграничное терпение при долгом обдумывании любого вопроса»\*.

Резерфорд говорил: «В лаборатории можно оставаться только до 6 часов — нужно время для размышлений»\*.

Успехов достигает тот ученый, который думает постоянно. На любых этапах исследования при проведении опытов, сборе информации и т. д. должно проявляться активное отношение к ним. А формальный, механический, некритический подход — нетворческий. Необходимо пробудить в молодом человеке желание задать себе (или другому) вопрос: «Почему?» и ответить на него. Заметим, что человек рождается с потребностью задавать вопросы: «Почему?» и «Как?», а затем теряет ее. Видимо, система воспитания в семье, школе и т. д. это мало учитывает. Много дается фактов в готовом виде. Творческое начало несколько подавляется в связи с широким внедрением телевидения и другой готовой информации. Это надо иметь в виду.

**Самоорганизация труда.** Организация труда — необходимое условие любой работы. Однако спецификой творческого труда является его личностный характер. Для достижения успеха в этом труде мало интеллекта, нужны определенные моральные и волевые качества. Результат во многом зависит от психофизического состояния. Поэтому этот труд не поддается прямому воздействию и регулированию. Его организация обеспечивается главным образом через самоорганизацию.

Самоорганизация — это комплекс мер, проводимых самим человеком для обеспечения системы и порядка в работе.

*Организация рабочего места* — простейший элемент самоорганизации. На рабочем столе не должно быть

---

\* Цитируется по [12]. Варшавский К. М. Организация труда научных работников. М.: Экономка, 1975.

лишних вещей; книги, бумаги, картотеки следует располагать на полках, в шкафах так, чтобы их можно было быстро находить, брать и ставить на место; каждая вещь по возможности должна иметь постоянное место.

*Система в работе.* Центральный элемент самоорганизации — соблюдение системы в работе и прежде всего режима.

Соблюдение правильного режима рабочего времени года (работа — отпуск), недели (рабочие дни — выходной) и рабочего дня (с утра делать трудную работу, соблюдать перерывы). Единого рецепта установить нельзя. Многие ученые наивысшую работоспособность имеют во вторую половину дня. Правда, как писал академик Н. Н. Семенов: «...Когда ученый занимается страстно любимым делом, предел нагрузки бывает чрезвычайно высоким без всяких вредных последствий»\*. Поэтому перегрузок не следует опасаться, но они не должны быть систематическими.

Соблюдение выбранного темпа и напряженности работы.

Чередование разнохарактерных работ: легких и трудных, творческих и стандартных и т. д.; разрывы (интервалы) между одинаковыми работами могут быть от нескольких часов до нескольких дней, но не следует забывать, что научная работа требует сосредоточенного внимания и фиксации в памяти многих данных, восстановление которых после длительного перерыва затруднено.

Чередование разнородных процессов, если возможно (говорить, читать, писать, слушать и т. д.).

Режим предотвращает утомление.

Кроме режима (или внешнего порядка), в работе должен быть внутренний порядок. Основной элемент этого порядка — последовательность. И. П. Павлов писал: «Никогда не беритесь за последующее, не узнав предыдущего. Изучите азы науки прежде, чем пытаться взойти на ее вершины»\*\*. Последовательность нужна в выборе предметов и объектов исследования, при замене устаревших методов работы прогрессивными — иначе много будет затрат энергии на преодоление инерционных сил. Нужно отличать разумную последовательность

---

\* «Литературная газета», 1970, № 11.

\*\* Павлов И. П. Лекции по физиологии. М.: Изд. АМН СССР, 1949, с. 7...8.

от отсутствия гибкости и наличия упрямства, которые вводят в соблазн отстанывать избранный путь, хотя он неэффективен. Последовательность не должна выражаться в прямолинейности, т. е. движении на один результат без остановки внимания на неожиданных, «нелогических» явлениях.

Система в работе предполагает системность, т. е. соблюдение единой методики и техники выполнения однородных работ, применение единой терминологии, единства формы и стиля изложения и т. д. Это экономит труд как собственно исследователя, так и других (не приходится каждый раз сочинять по-новому).

*Основные правила систематической работы* могут быть предложены такими:

- не работать без плана;

- прежде чем браться за работу, рассчитать свои силы и время;

- заранее подготовить необходимое для работы и разгрузиться от мелких дел: они отвлекают внимание;

- сложную работу делать перед простой, трудную — перед легкой; творческую — перед механической и стандартной;

- пока не закончено одно дело, не начинать без необходимости другого; но часто дело «застопорилось», и попытка столкнуть его с «мертвой точки» не приводит к ожидаемым результатам, тогда полезно взяться за другое дело, отвлечься, а уже потом вернуться к начальному делу;

- постоянно контролировать свою работу (по плану, задачам и т. д.) и вовремя вносить исправления;

- занимаясь любым вопросом, видеть не только промежуточную, но и конечную цель (иначе уйдешь в сторону).

Соблюдение системы в работе невозможно без соблюдения дисциплины труда и дисциплины мысли, т. е. сосредоточения всех своих сил на решении сложной задачи, требующей длительного нераздельного внимания. Во время работы необходимо сосредоточиться, не отвлекаться.

Выработка системы в работе способствует закреплению умений в навыках и привычках, что облегчает труд и экономит время. Это относится к многим, часто повторяющимся действиям: чтению и письму, беседам и выступлениям, наблюдениям и экспериментам.

*Самоограничение* — один из основных элементов самоорганизации на всех этапах работы.

При конкретизации темы мы ограничиваем предмет исследования — это относится прежде всего к формулированию задач исследования. Большинство изучаемых вопросов сельскохозяйственной техники имеет несколько сторон, и изучить их все не представляется возможным, да и нецелесообразно. Поэтому исследователь должен ограничить свои задачи, аргументировать их. Изучение диссертаций, поступающих в Ученый совет, показывает, что начинающему исследователю это дается с трудом и часто, не ограничив свои задачи, он работает несколько лет, а диссертация представляется расплывчатой, мало-доказательной.

Самоограничение важно на стадии сбора материала. Канадский физик Г. Селье справедливо указывал, что если мы хотим выполнить нашу задачу, не обременяя себя лишним балластом, мы должны знать не только, что следует изучать, но и чего изучать не следует. Во время исследования накапливается масса материала, который не используется.

Особенно необходимо самоограничение на завершающей стадии исследования — при литературной обработке; жалко отказаться от данных, добытых упорным трудом, но работа, перегруженная фактами, теряет стройность, обобщимость.

Нельзя, однако, упускать из виду, что самоограничение может упростить задачу, а это сделает работу малоубедительной и малоприменимой. Поэтому ограничения должны быть тщательно продуманы.

*Критичность и самокритичность* — один из основных принципов самоограничения.

Великое значение самокритики очень точно определил академик Н. Н. Семенов: «Самым трудным, но и самым главным для ученого является необходимость быть предельно строгим и беспристрастным критиком и судьей своих гипотез, своих опытов, своих соображений. Он должен быть как бы врагом самому себе — в этом и трагедия, и величие ученого»\*.

Критическое отношение к своей работе должно быть на всех этапах. Ученый не должен проходить мимо фактов, положений, противоречащих гипотезе, выводам, и

---

\* Наука и жизнь, 1972, № 2, с. 41.

обращать на них не менее пристальное внимание, чем на подтверждающие.

Самокритичный исследователь не только не должен предвзято воспринимать возражения, но и вызывать на себя огонь критики. Сумев организовать спор, он может использовать его итоги в работе. Исследователь должен при критических выступлениях в его адрес, при ответах на вопросы держать себя в «узде», чтобы не отпугнуть критиков.

Самокритичность подкрепляет моральное право выступать со смелой критикой других.

Иногда у людей, глубоко преданных своему делу, из-за отсутствия самокритики убежденность превращается в предвзятость. Сжившись со своей концепцией, они становятся слепы и глухи ко всему новому. Это нередко приводит к большим потерям и в науке, и в производстве.

Самокритика должна сочетаться с критикой. Положения никем не опровергнутые, только поэтому не могут считаться правильными. Но критика ученого — это обоснование отказа от чужого вывода и обоснование своего. Не такая критика, как сказать: «Этого не может быть», а на вопрос: «Почему» — ответить: «Надо подумывать».

Основу всей самоорганизации составляет работа над собой. Все изложенные выше приемы хороши. Однако, пока они не входят в привычку, использовать их трудно, особенно если есть привычки противоположные. Осуществление, например, плановости требует сочетания твердости характера и гибкости. Другие приемы требуют терпения и настойчивости, самообладания и выдержки, контактности и приспособляемости. Некоторые из них врожденные, другие нужно воспитывать в себе.

*Самопроверка* относится к этому же принципу. Это проверка подготовки к исследованию, проверка своего умения выполнять отдельные этапы работы (обработку результатов, работу с прибором), проверка каждой части выполненной работы.

**Некоторые технические приемы организации труда.** Вкратце нужно остановиться на некоторых технических приемах организации труда.

*Членение работы на этапы.* Для научного исследования этапы показаны на схеме исследования в главе I.

Этап — это отдельные, целые, логически связанные

части работы. Как указывалось, пригодной для всех случаев схемы не существует, поэтому и этапы могут быть другими. Выполнение отдельных этапов может быть последовательным и параллельным.

*Создание резервов времени.* Как отмечалось, исследование связано с риском не получить желаемый результат на отдельных этапах и в целом. Нужно время для обнаружения ошибок, преодоления непредвиденных трудностей, дополнительных опытов и т. д. Для этого в графике работы необходимо предусмотреть некоторый резерв. Экономия времени на отдельном этапе не должна растрачиваться на него в соответствии с графиком. Вообще-то исследователи предпочитают иметь «задел» и включать в планы работы с выполненными отдельными этапами.

*Фиксация хода и материалов исследования.* Наиболее эффективная форма — дневник (заполняется не реже одного раза в неделю, а лучше ежедневно). В него записывают прежде всего возникающие соображения, идеи, сомнения, некоторые результаты, объем работ, затруднения, меры и их эффективность и т. д. Они нужны для контроля, обсуждения хода работ, составления периодических отчетов, докладных, рапортов, определения вклада каждого в работу, помогают предотвратить ошибки и планировать работу в будущем. В дневник записывают мысли, сомнения, советы руководителя, замечания товарищей, собственные наблюдения и т. д.

*Работа по сбору информации.* На используемую литературу составляют картотеку. Полагают, что для исследований в технических областях нужно просмотреть литературу за последние 10...15 лет, но, если вспомнить, что «новое — это хорошо забытое старое», этого покажется мало.

Поиск и чтение часто лучше начинать с новых источников, двигаясь «в глубь веков». Это экономит время.

При подборе литературы прежде всего следует обратить внимание на монографии, журнальные научные статьи, диссертации, а потом учебники, которые по своей специфике часто отстают от жизни. Начинать розыск литературы надо с прочтения капитальных руководств по данной специальности. В конце их приводится ссылка на авторов и статьи.

Если найден один или несколько источников, то по ссылкам на литературу, когда найдена «ариадина

нить», можно собрать основную литературу. Но при этом нет полной уверенности в том, что собрана вся литература; необходимо просмотреть предметный указатель в отечественных и иностранных реферативных журналах.

В настоящее время развиты и в значительной степени механизированы информационно-поисковые системы. Но это не освобождает исследователя от поисков: он лучше знаком с темой и в процессе поиска у него возникают ассоциации. Исследователь может обратить внимание на работы, имеющие косвенное, но порой очень важное значение, чего нельзя требовать от информатора. Начинать надо с определения размера требуемой библиографии: какие страны и языки, вид литературы, хронология и т. д. Необходимо знать реферативные журналы, издающиеся у нас и за границей. При комплексном исследовании следует ознакомиться с библиографией по соответствующим темам. Исследователь должен изучить методику составления и использования библиографических указателей, и прежде всего предметных. Начинающему исследователю самому это сделать трудно: следует обратиться за консультацией к библиографу.

Читать нужно первоисточники, а не их пересказ. В пересказе много опущено из того, что может потребоваться. По отдельным фрагментам, цитатам нельзя установить целостные взгляды автора. Кроме того, не всегда цитаты, приводимые в литературе, берутся из первоисточников.

Как же изучать литературу?

Большинство ученых склонны изучение литературы разбить на два этапа. На первом из них уясняют, что изучалось и каковы основные мысли, какой фактический материал приводится в ней, а на втором — приступают к детальному изучению. Часто оказывается, что из всей проработанной литературы нужна только ее часть, детальное же изучение всей литературы связано с большой затратой времени. Поэтому не следует изучать литературу на всякий случай. Удобнее на первом этапе подготовить выписки, позволяющие быстро, в случае необходимости, найти источник (название работы, наименование источника, год и номер), а также основные идеи, наименование фактического материала (а не сам материал). Детальное конспектирование предполагается



на втором этапе. Некоторые исследователи предпочитают работу над литературой завершить в один прием.

Изучение литературы надо систематизировать, а результаты прочитанного проанализировать. Следует выявить все имеющиеся противоречия и несогласованность в решении тех или иных вопросов. Установить, согласуются ли выводы, исходные позиции с техническим прогрессом, с практикой сегодняшнего дня. Нужно попытаться установить причины противоречий, выявить нерешенные вопросы, недостаточно обоснованные, но имеющие большое значение. В. И. Ленин весьма критично относился к фактам: сам проверял цифры, пересчитывал напечатанные официальные таблицы.

Надо создавать «личный архив». Хранить собранные автором материалы лучше в отдельных папках, каждой из которых давать тематические названия. Особое внимание надо уделить первичным материалам, т. е. материалам, полученным непосредственно при эксперименте. Эти материалы должны быть пронумерованы, на них следует указать дату проведения, название эксперимента, кем проведен эксперимент и иметь подпись соответствующего лица.

Когда материалы записаны в тетради, журнале, альбоме и др., то в конце следует указать число страниц и скрепить сургучной печатью. Осциллограммы, магнитные пленки должны быть завернуты по отдельности. На упаковке следует написать название опыта, дату его проведения, число опытов и др.

Если прочитанное не воспринимается, надо найти причину этому. При работе с технической литературой это часто бывает потому, что читающий забыл те или иные положения теоретической механики, сопромата и других общетехнических, иногда специальных, дисциплин, а автор исходит из них, полагая, что читателю они известны. В таком случае надо вспомнить эти положения, обратившись к соответствующим учебникам. Очень важно уметь отличать основное от второстепенного. Но это не так просто: начинающий исследователь должен много работать, чтобы научиться этому. Если встретились незнакомые понятия или слова, то надо разобраться в них, особенно когда это нужно для понимания главного.

Только тогда можно считать источник изученным, когда читающий может сформулировать, в чем его глав-

ная мысль и насколько она доказана и аргументирована. Весьма желательно, чтобы изучающий мог возразить автору статьи или поддержать его, отправляясь от собственного и передового опыта, руководствуясь логикой.

Необходимо все записи располагать в определенной системе. Это позволит быстро разыскать нужный источник. Лучше эту систему разработать с самого начала знакомства с литературой, а если этого нельзя сделать, то систематизировать записи по мере их накопления.

## **2. О диссертации**

При выполнении диссертационных работ принципиальные общие требования к научным исследованиям сохраняются. Но вследствие того, что диссертация представляет собой квалификационную научную работу, к ней предъявляются специфичные требования. В специальном положении записано: «Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук является законченной научно-исследовательской работой, выполненной самостоятельно или под руководством доктора наук, содержащей новое решение актуальной научной задачи, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний».

**Тема диссертации**, с одной стороны, должна быть такой, чтобы диссертант мог ее выполнить самостоятельно, а с другой стороны, она должна быть связана с планом научных работ научно-исследовательских учреждений (научно-производственных объединений) и вузов. Поэтому при выборе темы кандидатской диссертации лучше ставить задачу сравнительно узкого плана в новой малоизученной области. Это позволит разработать тему глубоко и за намеченный срок. Тема, безусловно, должна быть актуальной, иметь научное и практическое значение.

В диссертации по механизации сельского хозяйства основное внимание уделяется исследованиям и разработкам прогрессивных технологических процессов; совершенствованию и созданию высокопроизводительных машин, приспособлений и приборов; улучшению использования сельскохозяйственной техники с целью более качественного выполнения работ, повышения производительности, уменьшения затрат средств и топлива, а так-

же разработке методов и средств автоматизации и механизации производства.

Иногда для выполнения темы нужна сложная аппаратура, большое количество исполнителей, значительные затраты средств, но всем этим соискатель не располагает. Поэтому тему следует выбирать с учетом материальных и других возможностей, чтобы избежать поверхностных и неглубоких разработок. Тема диссертации может быть названа как самим соискателем, так и подсказана руководителем или другим опытным исследователем (специалистом).

Очень полезно широкое обсуждение темы не только на ученых советах при утверждении, но и предварительно в лаборатории, на кафедре, на семинаре молодых ученых и т. д.

**Публикации.** Основные результаты исследований публикуются автором кандидатской диссертации в научных печатных изданиях. К опубликованным работам приравниваются также дипломы на открытия и авторские свидетельства на изобретения, алгоритмы, включенные в Государственный фонд, рукописи работ, депонированные в НИИ общесоюзной системы научно-технической информации и аннотированные в научных журналах; а также тезисы докладов, сделанных на международных, всесоюзных или республиканских научных съездах, конференциях, семинарах и симпозиумах. При планировании работы над диссертацией надо иметь в виду, что результаты по кандидатской диссертации должны быть опубликованы за 3 месяца до защиты, поэтому публикацию, подачу заявок на изобретение не следует задерживать.

В диссертацию включают как теоретическое обоснование, разработанное автором, так и экспериментальные результаты, которые подтверждают с достаточной достоверностью выдвигаемые автором теоретические предпосылки. Если же проводятся только экспериментальные исследования, строго обосновывается методика как проведения работ, так и обработки полученных данных с оговоркой — для каких условий справедливо, т. е. имеет смысл предлагаемое решение.

Предлагаемые соискателем решения проблемы или задачи должны быть существенными по сравнению с имеющимися и строго аргументированы, критически оценены.

**Оформление.** Для кандидатских диссертаций ограничен объем, и он не должен превышать 150 страниц машинописного текста, напечатанного через два интервала (исключая рисунки, таблицы, графики и список литературы).

**Наиболее часто встречающиеся промахи при написании диссертации следующие.**

*Анализ состояния вопроса, в том числе литературный обзор*, как отмечалось в главе I, выполняется для того, чтобы диссертант смог сформулировать задачи исследования. Однако иногда он приводит литературу, которую читал, но к изучаемому вопросу она прямого отношения не имеет и не используется при постановке задачи. Диссертант, например, изучает уборку зерновых культур или техническое обслуживание и начинает излагать, что уборкой зерновых или техническим обслуживанием занимались такие-то исследователи, приводит длинный список литературы [2, 5, 7...95]. Работы же не анализируются и в дальнейшем не используются. Необходимости в этом списке нет. Это только загромождает диссертацию. Другой пример. По характеру предполагаемой работы диссертанту надо определить пропускную способность системы: уборочно-транспортного комплекса, пункта или станции технического обслуживания. Он перечисляет работы по теории массового обслуживания и статистического моделирования, при этом не только те, которые потребовались бы, а все ему известные. Да еще приводит историю вопроса и, более того, дает оценку этих работ по значимости. Но это не по силам диссертанту, и потому он может только пересказать изложенное в литературе, допустив, как это иногда бывает, ошибки.

*Расплывчатая, неконкретная формулировка задач* вызывается тем, что часто ставится много задач, часть из которых имеет подчиненное значение. Иногда ставятся задачи, явно превосходящие возможности диссертанта: они не обеспечены материально, или выполнение их возможно только крупным коллективам и т. д.

Вот первый попавшийся под руку пример (из одного автореферата): «С учетом изложенного в настоящей работе поставлены следующие задачи исследования:

1. Теоретически и экспериментально обосновать оптимальный состав автопоезда на перевозке силосной массы по принятым критериям эффективности.

2. Определить области применения автомобильных и тракторных поездов в зависимости от конкретных условий.

3. Установить зависимости соотношений силосоуборочных комбайнов, транспортных и разгрузочных средств.

4. Разработать метод разгрузки автопоезда при перевозке сыпучей массы.

5. Провести экспериментальную проверку основных результатов исследования и внедрить их в производство.

Во-первых, многие из этих задач могли бы быть задачами кандидатской, а может быть даже и докторской, диссертации. Например, задачи 2, 4.

Во-вторых, только во второй задаче имеются ограничения, да и то не указано, что же это за конкретные условия.

В-третьих, как понимать задачи 4 и 5?

*Пересказ, переписывание из литературных источников положений не только в их конечном виде, а с доказательствами и промежуточными преобразованиями.* Так, те, кто пользуется теорией массового обслуживания, нередко приводят дифференциальные уравнения вероятностного состояния системы и необходимые доказательства этих состояний. Тогда как следовало бы привести конечные формулы, сославшись на источник.

*Часто рисунки не снабжаются надлежащими подписочными подписями* и для того, чтобы проанализировать, что на них представлено, надо адресоваться к тексту диссертации.

*Иногда методики исследований изложены с большими изъянами.* Например, не указываются условия проведения опыта — в полевых опытах отсутствуют характеристики почвы и хлебной массы, описание рельефа, характеристики агрегата — в то время как результаты исследования сами по себе еще ни о чем не говорят, они важны только с учетом того, как они получены и для каких условий.

*Часто нарушается логика, без которой невозможна хорошая диссертация.*

*В выводах не всегда указывается, в какой мере решены поставленные задачи исследования; не отражено, в какой мере полученные зависимости согласуются с теорией.* Более того, встречаются выводы тривиальные, которые известны без предлагаемого исследования.

*До сего времени встречается большое количество ссылок на авторефераты диссертаций, что противоречит соответствующим положениям ВАК и логике.*

К данной главе рекомендуется литература [12, 61].

# Глава III

## Механико-математические методы исследования

### 1. К выбору метода исследования

Особенности механизации сельскохозяйственного производства. При создании машин и комплексов, а также их эксплуатации следует помнить, что чаще всего они будут воздействовать на живой организм и могут нанести ему вред, последствия которого проявятся не сразу. Так, плохая вспашка, низкокачественный посев, травмирование зерна и т. д. приведут к снижению урожайности.

В сельскохозяйственном производстве выполняется большое количество разнообразных операций и производственных процессов, как правило, за короткий отрезок времени. Перенос срока проведения операции невозможен, более того, даже сдвиг их сопровождается большими потерями. Из этого вытекают следующие особенности: кратковременность действий, частая перестройка производственных линий, комплексные решения в связи с тем, что отдельные элементы производственных линий являются общими.

Сельскохозяйственное производство в нашей стране, как правило, массовое, для которого характерна специализированная техника.

Вследствие биологических особенностей выращивания растений, полеводство рассредоточено на больших площадях, поэтому появляются специфические операции: сборочно-транспортные, распределительно-транспортные, выполняемые наряду с технологическими операциями мобильной техникой.

Характерная особенность сельскохозяйственного производства — низкая стабильность; сроки выполнения работ в отдельные годы не остаются постоянными, условия проведения отдельных работ изменяются, изменяются число и характер воздействия на обрабатываемый материал и т. д.

Особое значение в сельскохозяйственном производстве приобретает качество выполнения операции, ибо переделать брак, как правило, не представляется возможным; приобретают особое значение меры предотвращения брака.

Эти и другие особенности сельскохозяйственного производства непременно должны быть приняты во внимание, более того, быть отправными при изучении вопросов механизации сельскохозяйственного производства, при создании машин и их эксплуатации, при проектировании производственных процессов.

Из множества операций и процессов вытекает комплексное решение вопросов.

Из низкой стабильности производства следует, что: эксперименты должны быть проведены или в течение ряда лет, или в разных условиях; число наблюдений определено с учетом варьирования изучаемой величины и ее надежности; при проектировании производственных линий следует предусматривать компенсаторы, резервы. Ввиду изменяющихся условий следует иметь различный набор рабочих органов и даже отдельных машин и т. д.

Массовость производства в нашей стране следует принимать во внимание при заимствовании опыта механизации сельскохозяйственного производства других стран, где часто размеры хозяйства отличаются от наших в несколько десятков раз и потому переносить механически этот опыт на наши условия нельзя.

Сборочно-транспортные и распределительно-транспортные операции имеют явно выраженную специфику и потому выполнение их часто надо отделить от перемещения — специализировать технические средства, т. е. для сбора (распределения) надо создавать одни средства, а для перемещения на сравнительно большие расстояния — другие. Как показали исследования, это дает большой эффект. Но названные операции присущи большинству производственных циклов, а потому технические средства для них надо создавать такие, чтобы

обеспечивалось выполнение как можно большего числа операций.

Показатели качества для многих задач могут быть выбраны как основные критерии, например при оценке рабочих органов машин. Если за критерий взяты другие показатели, то на показатели качества должны быть непременно наложены ограничения, ибо свести их к другим очень сложно, громоздко, а точность расчета при этом низкая. Следовательно, неоправданно усложняется задача.

**Оптимизация решений.** Большинство решений должно быть доведено до оптимальных.

Под оптимальностью обычно понимают одно из двух: оптимальное — это лучшее решение с какой-нибудь одной стороны, т. е. лучшее по одному наиболее важному показателю; такие решения приемлемы для частных задач, например при нахождении оптимальных параметров рабочих органов, передаточных механизмов и т. д., а показатель служит критерием (мерой) соответствия решения поставленной цели;

оптимальное — такое решение, когда реально осуществимые изменения не увеличат его полезности.

Решение выполняется по нескольким критериям или эти критерии сводят к одному. Однако следует иметь в виду, что при сведении всех показателей к одному делается много допущений мало обоснованных. Поэтому такому решению придается только по форме вид «научности», а не по существу.

Часто оптимизацию проводят по одному критерию, а на все другие важные показатели налагают ограничения, или по комплексному критерию типа

$$\frac{\omega}{E}; \quad \frac{\omega}{M_a},$$

где  $\omega$  — производительность;  $E$  — приведенные затраты средств;  $M_a$  — масса агрегата.

Как представляется, при решении на оптимум задач, связанных с механизацией сельскохозяйственного производства, следует искать оптимальное решение по нескольким критериям и принимать компромиссное решение [32]. При этом целесообразно изменение различных показателей в зависимости от оптимизируемого параметра представить графически с тем, чтобы было видно, как изменяется показатель в зонах, близких к опт-



мальной. Обязательное условие оптимизации — обеспечение требуемого качества выполняемых работ, без этого теряется смысл решения.

За критерий эффективности при решении производственных задач, связанных с механизацией процессов и производства, чаще всего принимают: производительность отдельных групп машин и производственной линии в целом, вероятность простоя и коэффициент загрузки оборудования или рабочих, прямые и приведенные затраты средств, интегральные затраты.

**Решаемые задачи.** В сельскохозяйственном производстве много разнообразных производственных операций и процессов. Еще больше научных задач. Среди них — обоснование комплексов машин для возделывания и уборки тех или иных культур в отдельной зоне, обоснование технологической схемы отдельных машин, изыскание более современных рабочих органов машин и обоснование их параметров, выбор и обоснование средств энергетики, обоснование оптимальных режимов работы агрегатов, определение оптимального соотношения отдельных групп машин производственного процесса. Далее определение технологических допусков, установление предельных состояний отдельных деталей и механизмов, изыскание новых технологий, а также оптимальных режимов технического обслуживания, лучших эксплуатационных материалов, разработка путей экономии топлива и смазки, определение различных показателей работы агрегатов, установление лучших способов движения и т. д. и т. п.

При этих исследованиях применяются разнообразные методы. Изложить их все не представляется возможным, поэтому в предлагаемой главе приводятся только основные методы, применяемые при решении вопросов механизации.

## 2. Методы классических наук

В исследованиях по сельскохозяйственной технике речь идет прежде всего о методах теоретической и прикладной механики, о методах теплотехники, гидравлики и т. д. Разумеется, перечислять все методы как общие, так и частные не представляется возможным. Да в этом и нет необходимости, так как инженер-механик изучал их в вузе. Наиболее часто исследователю по механизации

ции сельского хозяйства приходится сталкиваться с вопросами динамики машин и агрегатов. При исследовании конструкции машин, их эксплуатации приходится определять, как реагирует система (машинный агрегат, рабочая машина или сборочная единица) на внешние воздействия (сопротивления среды перемещению агрегата, сопротивления материала разрушению, неровности рельефа и т. д.), и изменять в соответствии с этим ее параметры.

**Выходные показатели** — допускаемые или желаемые — известны: ускорения, действующие на механизатора ( $j \leq 0,3g$ ), напряжения ( $\sigma \leq [\sigma]$ ), степень дробления зерна (не более 2%), неравномерность глубины обработки (коэффициент вариации глубины вспашки не более 10%) и др.

Система должна реагировать на внешние воздействия так, чтобы получались желаемые выходные показатели.

В конечном счете требуется определить значения параметров системы  $\Pi_i$ , обеспечивающие при известных входных воздействиях желаемые выходные показатели.

Возможна постановка и другой задачи — определить допускаемые значения входных воздействий при известных допускаемых значениях выходных показателей и параметров системы.

Упрощенная схема конкретной динамической системы (самоходный зерноуборочный комбайн) представлена на рисунке 2. При движении комбайна изменяется сопротивление перемещению его колес и башмаков жатки из-за неравномерной плотности почвы. Входами здесь служат опоры комбайна, входное воздействие — сопротивление движению этих опор  $R(t)$ . Неровности микрорельефа  $z(t)$  как входное воздействие поступает на опоры комбайна. При этом не исключено, что эти два воздействия или воздействия микрорельефа на разные

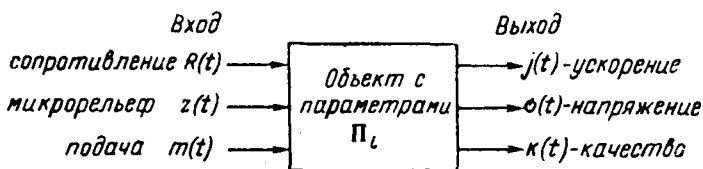


Рис. 2. Упрощенная схема динамической системы (комбайна).

опоры машины связаны между собой. Хлебная масса, подача которой  $m(t)$  непостоянна, поступает на подборщик. Каждое из этих воздействий в какой-то мере сказывается на многих выходных показателях. На рисунке указаны только три из них, которые, допустим, интересуют исследователя. Ускорения комбайнера на сиденье  $j(t)$  и напряжения в раме машины  $\sigma(t)$ , положим, зависят главным образом от изменений микрорельефа, показатель качества обмолота  $k(t)$  — от изменений подачи и микрорельефа.

Из этого примера видно, что выбор рассматриваемых или учитываемых входных воздействий определяется интересующими исследователя выходными показателями с учетом идеализации явления.

**Параметры**  $\Pi_i$  системы (возможные): масса комбайна, скорость его движения, частота вращения барабана и другие, в том числе искомые параметры рассматриваемой системы, например, для выхода  $j(t)$  — давление в шинах, жесткость и демпфирование подвески сиденья, для качества обмолота — площадь соломотряса.

**Входные воздействия** могут быть детерминированными, или почти детерминированными, т. е. с известными зависимостями их от времени, по которым можно с достаточной точностью найти значение воздействия в любой момент времени  $t_i$ . Например,

$$R(t) = R_0 \sin \omega_0 t; \quad R(t_i) = R_0 \sin \omega_0 t_i, \quad (\text{III.1})$$

где  $R_0, \omega_0 = \text{const}$  или изменяются по известному закону. Для заданной системы в этом случае обычно просто устанавливается или известна взаимосвязь между воздействиями, если она есть. Например,

$$z(t) = b R_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где  $b, R_0, \omega_0, \varphi_0 = \text{const}$  или изменяются по известным законам.

**Составление дифференциальных уравнений.** Если воздействия детерминированы, то при исследовании описанных выше систем используются методы классических наук. Общий прием этих методов, их суть — составление дифференциальных уравнений «движения», которые связывают характеристики входных воздействий (положим,  $R, z, m$  и др.), параметры системы  $\Pi_i$  и выходные показатели системы (в примере:  $j, \sigma, k$ ).

В этом случае прибегают к составлению уравнений динамики, необходимых для построения моделей сложных механических систем. Исходным является второй закон Ньютона, выражающийся для материальной точки, если она свободна, как

$$m\vec{j}=\vec{F}$$

и, если она не свободна,

$$m\vec{j}=\vec{F}+\vec{R},$$

где  $m$  — масса точки;  $\vec{j}$  — вектор ускорения;  $\vec{F}$  — результирующая приложенных (активных) сил;  $\vec{R}$  — результирующая реакций связи.

Во втором уравнении содержатся известные реакции связи. Для материальных точек свободной системы, когда активные силы представляют собой известные функции координат, производных от координат по времени и времени, при составлении получают уравнения в проекциях на все оси координат. При этом координаты независимы и их число равно числу степеней свободы. В этом случае дифференциальные уравнения динамики системы получаются в виде системы замкнутых уравнений, решение которых возможно.

Составление уравнений динамики с использованием непосредственно уравнения Ньютона возможно и целесообразно для сравнительно простых систем. То же самое можно сказать о принципе Даламбера. Конечно, понятие «простое», само по себе растяжимое. Для одной и той же системы в зависимости от изучаемого явления можно прибегать к уравнению Ньютона и к уравнению Лагранжа. Так, для определения составляющих тягового баланса агрегата во многих случаях достаточны уравнения Ньютона. Когда же материальные точки системы не свободны, например точки приведения масс машинного агрегата, уравнения Ньютона являются исходными, но преобразованы в дифференциальные уравнения Лагранжа первого и второго рода, уравнения Аппеля, канонические уравнения Гамильтона и др. В исследованиях по сельскохозяйственной технике чаще всего пользуются уравнениями Лагранжа второго рода [14, 15, 17].

Входные воздействия  $X(t)$  и показатели на выходе часто называют сигналами,  $Y(t)$  можно представить в виде  $Y(t)=AX(t)$ . Здесь  $A$  называют оператором, представляющим собой совокупность математических дейст-

вий, отражающих преобразование возмущений, под влиянием которых находится система.

Операторы характеризуются структурой и параметрами. Структура описывает последовательность математических действий с входными сигналами, а параметры представлены в виде чисел, определяющих пропорциональность математических действий. Структура чаще всего обуславливает решение дифференциальных уравнений.

Таким образом, для описания поведения динамических систем составляют и решают дифференциальные уравнения. При теоретическом (аналитическом) методе сложную систему приводят к более простой (эквивалентной) и описывают ее поведение чаще всего при помощи дифференциальных уравнений динамики системы материальных точек. Но часто машинные агрегаты и другие технические объекты настолько сложны, что аналитическим методом описать их нельзя или нельзя быть полностью уверенным в правильности описания. Тогда математическая модель строится по результатам эксперимента, т. е. по изменению выходных показателей (сигналов) в зависимости от входных воздействий.

При исследовании сельскохозяйственной техники часто теоретический метод сочетается с экспериментальным. При этом данные, полученные в эксперименте, позволяют уточнить теоретическую модель.

Для моделирования сложных систем чаще всего применяют уравнения Лагранжа второго рода. Для системы со связями, наложенными на точки системы и ограничивающими перемещение, или для так называемых голономных систем уравнения Лагранжа второго рода имеют вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} = - \frac{\partial U}{\partial q_j} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_j} + Q_j. \quad (\text{III.2})$$

Для систем со связями, наложенными на точки системы и ограничивающими не только, перемещение, но и скорости в направлении некоторых таких перемещений (для неголономных систем), уравнения имеют вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} = - \frac{\partial U}{\partial q_j} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_j} + Q_j + \sum \lambda_i A_{ij}, \quad (\text{III.3})$$

где  $T$  — кинетическая энергия системы;  $q_j$  — обобщенные координаты;  $U$  — потенциальная энергия;  $R$  — диссипативная функция, т. е. энергия, зависящая от скорости;

$Q_j$  — проекция обобщенной силы;  $\lambda_i$  — неопределенные множители Лагранжа;  $A_{ij}$  — коэффициенты при скоростях в негOLONOMных равенствах.

Последовательность применения уравнений Лагранжа к решению задач динамики следующая:

определение числа степеней свободы и выбор системы обобщенных координат;

отыскание обобщенных сил;

определение кинетической энергии как функции обобщенных координат и обобщенных скоростей;

составление уравнений Лагранжа второго рода;

интегрирование уравнений и определение произвольных постоянных интегрирования по начальным условиям задачи;

определение реакций связи;

исследование найденного решения и его техническая интерпретация.

### 3. Статистическая динамика

Во многих случаях при исследовании сельскохозяйственной техники (при такой же постановке вопроса, как в начале п. 2, гл. III) воздействия оказываются недетерминированными или несводимыми к детерминированным. Они представляют собой случайные процессы или случайные функции времени.

**Случайная функция времени или случайный процесс** — это функция, значения которой в каждый данный момент времени являются случайной величиной, т. е. нельзя указать их точно, а можно указать лишь с какой-то вероятностью.

Пусть, например, мы имеем непрерывные записи изменения глубины вспашки в трехкратной повторности (рис. 3). Каждая из записей представляет собой отдельную реализацию случайного процесса и, как видно из рисунка, они неодинаковы.

Если в случайном процессе выделяются одна-две синусоиды и они достаточно хорошо аппроксимируют (сглаживают) случайности в процессе, то можно упростить решение, приняв воздействие детерминированным. Так можно поступить иногда с воздействием неровностей, получаемым при движении агрегата поперек направления вспашки одно-двухкорпусным плугом.

Возможны случаи воздействия типа развалных борозд или свальных гребней, расположенных на случайных расстояниях один от другого и имеющих случайную глубину или высоту. Если при движении агрегата

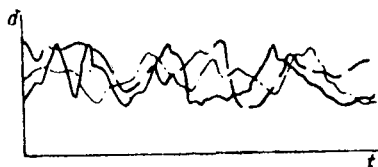


Рис. 3. Запись глубины вспашки в трехкратной повторности.

поперек подобных препятствий колебания, вызываемые каждым из них, затухают или почти затухают при прохождении промежутков между соседними препятствиями, их можно рассматривать как единичные детерминированные воздействия, если нет — они представляют собой случайный процесс (последовательность).

Когда воздействия представляют собой случайные процессы, решить рассмотренную в параграфе 2 главы III систему дифференциальных уравнений не представляется возможным.

В ряде случаев решение задачи, т. е. статистические характеристики тех же выходных показателей  $j$ ,  $\sigma$ ,  $k$ , получают с использованием указанной в параграфе 2 этой главы системы уравнений и статистических характеристик входных воздействий методами статистической динамики.

Входные воздействия при этом представляют собой стационарные случайные процессы (или приводимые к такому виду). Опыт показывает, что при использовании сельскохозяйственной техники преобладают именно такие процессы. Им присуща независимость их характеристик от начала отсчета во времени, что позволяет определить характеристики по одной достаточно длинной реализации. Независимых же характеристик случайной функции две: среднее значение или математическое ожидание — например, средняя глубина пахоты — и корреляционная функция  $R_x(\tau)$ .

**Корреляционная функция** отражает в какой-то мере вероятность того, что случайная функция  $x(t)$ , имея в момент времени  $t$  значение  $x_1$ , будет в момент времени  $t+\tau$  иметь значение  $x_2$ , т. е. характеризует взаимосвязь между  $x(t)$  и  $x(t+\tau)$ . Это зависимость коэффициентов корреляции  $x(t)$  и  $x(t+\tau)$  от сдвига процесса на время  $\tau$  относительно самого себя.

В ряде технических приложений удобно вместо

$R_x(\tau)$  использовать преобразование Фурье от нее, которое является еще одной характеристикой случайного процесса — спектральной плотностью  $S_x(\omega)$ . Это понятие связано с разложением кривой случайного процесса на гармонические составляющие, как и всякой детерминированной периодической кривой. Спектральная плотность  $S(\omega)$  показывает, как распределяются составляющие общей амплитуды колебаний случайного процесса по синусоидам разных частот (по  $\omega$ );  $R(t)$  и  $S(\omega)$  определяют по результатам измерений ординат процесса.

Решение усложняется, если воздействия взаимосвязаны (коррелированы). Эта связь воздействий  $x(t)$  и  $y(t)$  характеризуется взаимными корреляционной функцией  $R_{xy}(\tau)$  и спектральной плотностью  $S_{xy}(\omega)$ .

Статистическими характеристиками выходных показателей могут быть средние значения и стандарты (дисперсии) измеренных значений этих показателей: дисперсия ускорений комбайнера на сиденье  $D_j$ , среднее значение и дисперсия напряжений  $m_\sigma$  и  $D_\sigma$  и т. д. Так как средним значением часто задаются или оно определяется методами статистики, то при исследовании динамики систем качество их функционирования оценивается обычно дисперсией. Характеристиками в данном случае могут быть и рассмотренные выше  $R(\tau)$  и  $S(\omega)$ , однако они используются редко вследствие трудности определения и применения их в условиях производства.

**Линейные системы** — системы, описываемые линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Соответствующие им уравнения решаются при исследовании наиболее просто. Многие нелинейные системы могут быть приближенно описаны линейными или линеаризованными уравнениями.

При зависимости выходного показателя от нескольких входных воздействий упрощение решения получается вследствие возможности использования принципа суперпозиции (результат суммы воздействий равен сумме результатов отдельных воздействий) и использования при решении только простых характеристик входных воздействий в виде  $R_x(\tau)$  или  $S_x(\omega)$ .

Разработаны методы статистической динамики и некоторых нелинейных систем. Ниже для упрощения рассмотрен пример линейной системы.

В основу методов статистической динамики линейных систем положено получение из системы дифференциаль-



ных уравнений передаточной функции (через преобразование их по Лапласу) или переходной характеристики, которые определяют реакции системы на соответствующие входные воздействия. Далее используют «простые» связи. Например, дисперсию выходного показателя, положим, ускорений комбайнера на сиденьи, вызванных неровностями микрорельефа, найдем как

$$D_{jz} = \int_0^{\infty} |W_{jz}(i\omega)|^2 S_z(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} S_{j(z)}(\omega) d\omega, \quad (\text{III.4})$$

где  $|W_{jz}(i\omega)|^2$  — квадрат модуля передаточной функции от микрорельефа к ускорениям ( $i = \sqrt{-1}$  — передаточная функция — функция комплексного переменного);  $S_z(\omega)$  — спектральная плотность микрорельефа.

Выполнив расчеты по (III.4), при разных значениях параметра  $\Pi_i = \Pi_n$  получают зависимость  $D_{jz} = f(\Pi_n)$  и далее так же, как и при использовании классических методов, определяют оптимальное его значение для данных условий.

Очевидно, что можно получить передаточную функцию из (III.4) по известным  $S_{j(z)}(\omega)$  и  $S_z(\omega)$  и подобрать соответствующее аналитическое выражение, которое может показать, какие параметры системы оказывают наибольшее влияние на выходной показатель, или позволить прогнозировать значение выходного показателя в других условиях.

Следует отметить, что одни авторы отдают предпочтение спектральной теории, используя в исследованиях спектральные плотности и передаточные функции [48, 49]\*, другие — корреляционной, применяя корреляционные функции и переходные характеристики [48, 49, 57].

Методы статистической динамики лежат в основе решения задач, связанных с колебательными процессами в условиях случайных воздействий: уменьшение вибраций машин и их узлов, определение параметров подвесок сидений, определение параметров узлов или деталей, что-то выравнивающих (например, определение момента инерции маховика двигателя), и систем автоматического регулирования во всех областях техники (регулирование глубины пахоты, подачи массы в моло-

---

\* А также Солодовников В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. М.: Физматгиз, 1960.

тилку, поддержание микроклимата в теплицах и животноводческих помещениях и т. д.).

Метод связан с трудоемкими вычислительными работами, поэтому требует использования вычислительных машин.

#### 4. Теория подобия и физическое моделирование

Как известно, теоретические исследования и расчеты подтверждаются экспериментами. Однако в ряде случаев выполнить эту проверку на натуре не представляется возможным. Спроектировали Братскую ГЭС. Как проверить правильность расчетов? Когда построили, проверять поздно. Разработали конструкцию аэробуса на 360 мест. Как проверить возможность полета? Аэродинамической трубы такого большого размера нет. Необходимо испытать конструкцию, а подходящих условий нет или они очень кратковременны. Выход один — испытать физическую модель.

**Физическое моделирование** — моделирование с изменением масштаба, но с сохранением природы явления. Возникает вопрос о параметрах модели или масштабе уменьшения разных параметров: длин, углов, мощностей и т. д. Ответ на него дает теория подобия.

**Теория подобия** в своей основе содержит три теоремы, основным понятием в которых является критерий подобия.

Критерий подобия — безразмерный комплекс параметров, определяющих явление. Возьмем тело с массой  $m$ , которое вращается на шнуре длиной  $r$  с окружной скоростью  $v$ . Сила, растягивающая шнур, равна  $F$ . Тогда безразмерная комбинация будет следующей:

$$\frac{Fr}{mv^2} = k = \text{const.}$$

Модель и оригинал подобны, если равны соответствующие критерии подобия.

В нашей области исследований оригинал (натура) обычно дешевле физической модели и, кроме этого, часто очень трудно (или пока невозможно) для модели смоделировать условия работы (почву, хлебную массу и т. д.). Поэтому физическое моделирование используется редко.

При испытаниях наших машин (главным образом на надежность) часто моделируют условия работы или материал для оригинала: модели корней свеклы изготовляют из резины, хлебную массу — из обрезков полиэтиленовых трубок малых диаметров. Правда, теория подобия тут не используется — учитываются лишь нагрузочные режимы. Существуют тропические, арктические, пылевые камеры.

Теорию подобия, как показали академики В. П. Горячкин и Н. Д. Лучинский, целесообразно использовать для построения серии машин. При этом решаются две задачи:

оценка влияния главного размера в пределах серии (например, подобие вентиляторов);

определение границ, где целесообразно принципиально новое решение, изменение схемы машины: плуги навесные и полунавесные, одно- и двухбарабанные молотилки и т. п.

## 5. Аналоговое моделирование

Общая постановка вопроса та же, что и при использовании физического моделирования — трудно или невозможно испытать оригинал. Но и построить физическую модель тоже трудно или невозможно, или для нее нельзя смоделировать условия. В этих условиях, а также и во многих других прибегают к аналоговому моделированию на аналоговых электронно-вычислительных машинах (например, на МН-7).

**Основа метода** — тождественность дифференциальных уравнений, описывающих разные явления, объекты, процессы. В сущности это использование метода аналогий в моделировании разного рода (не только физических) систем.

Аналоговое моделирование — моделирование с изменением природы явления, но с сохранением его сущности.

Например, электрическая схема с индуктивностью, сопротивлением и емкостью (колебательный контур) и механическая система, включающая тело с какой-то массой и пружину с жесткостью и демпфированием, описываются уравнениями одного вида:

$$\ddot{X} + m\dot{X} + kX = P(t).$$

Таким образом, подбирают электрические схемы, тождественные трению разного рода, удару и т. д.

**Ход решения задачи следующий.** Имеется сложная система (допустим, агрегат), состоящая из  $n$  элементов. Дифференциальные уравнения для отдельных элементов составить легко. Общая система уравнений сложная или входное воздействие  $R(t)$  является случайной функцией. Значение выходного показателя ограничено. Например, ускорение  $j \leq 0,3g$ . Требуется определить, какой параметр, какого элемента и как нужно изменить, чтобы значение выходного показателя лежало в допускаемых пределах.

На основании тождества уравнений элементов собирают систему из  $n$  электрических элементов (блоков), на вход ее подают электрический сигнал  $R'(t)$ , на выходе получается непрерывная  $j'(t)$  запись. Меняя параметры системы, определяют их оптимальные значения.

Аналоговая вычислительная машина (АВМ) представляет собой основную машину с набором моделирующих блоков.

**Какие задачи решаются?** Практически все, в которых явление описывается дифференциальными уравнениями. Метод очень широко используется для проверки теоретических положений, однако впервые полученные с помощью такой модели выводы затем обязательно проверяют на натуре или физической модели по сокращенной программе, что значительно снижает затраты времени, труда и средств на исследование.

## **6. Теория массового обслуживания**

Теория массового обслуживания (ТМО) — теория о пропускной способности систем или теория очередей. Многие процессы в современном обществе стали массовыми. В связи с этим возникают задачи рационального, точнее оптимального соотношения между отдельными звеньями производственного процесса. Так, например, на автомобильном тракте расположена заправочная станция. Ставится задача — какое число колонок должно быть, чтобы обслужить автомобили, работающие на этом тракте? На том же тракте находится пункт технического обслуживания автомобилей. Какое количество рабочих необходимо для обслуживания с тем, чтобы

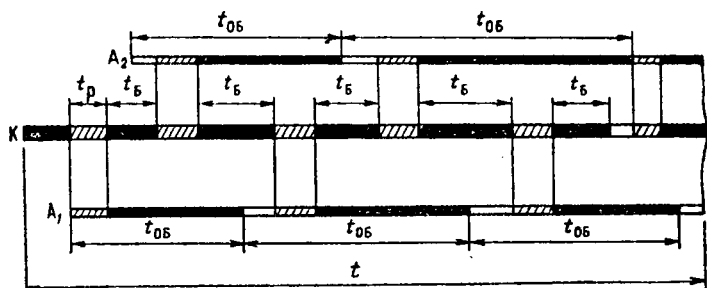


Рис. 4. Схема обслуживания зерноуборочных комбайнов К двумя автомобилями (приборами А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub>)

$t_б$  — продолжительность наполнения бункера;  $t_p$  — продолжительность совместной работы (обслуживания);  $t_{об}$  — время оборота транспорта.

рабочие были достаточно полно загружены, а автомобили вовремя подготовлены к работе? На поле работает группа комбайнов, возникает задача, какое количество транспортных средств необходимо выделить, чтобы обеспечить требуемый ритм работы. При этом заранее из-за нестабильности интервалов нельзя точно сказать, когда тот или иной автомобиль придет на заправку, техническое обслуживание или подойдет к комбайну. Об этом можно сказать только в общих чертах. Заметим, что эта теория о количественных соотношениях, а не о качественных.

**Работа системы массового обслуживания** (рис. 4) сводится к обслуживанию заявок, поступающих одна за другой через случайные отрезки времени. Обслуживающие единицы, их называют каналами, принимают заявку и обслуживают ее. При этом продолжительность обслуживания отдельных заявок не остается постоянной, характеристики же случайных величин как интервалов поступления заявок, так и продолжительности их обслуживания либо известны, либо могут быть получены из опыта.

Освободившийся канал приступает к обслуживанию следующей заявки. Система обслуживания обладает соответствующей пропускной способностью, зависящей от числа каналов и их производительности. В теории массового обслуживания устанавливаются зависимости между потоком заявок, пропускной способностью системы и эффективностью обслуживания, под которой в

зависимости от целей понимается время простоя оборудования, затраты средств, полнота загрузки рабочих.

Системы массового обслуживания разделяются прежде всего на разомкнутые и замкнутые.

*Разомкнутые системы* — такие, в которых требование обслуживается, покидает систему и в дальнейшем может в нее не возвращаться. Система как бы обслуживает все время новые требования. В рассмотренном примере заправочная станция, а также пункт технического обслуживания будут разомкнутыми системами.

*Замкнутые системы* — такие, в которых требование после обслуживания через какой-то отрезок времени вновь поступит в систему, т. е. будет циркулировать по замкнутому контуру. Обслуживание комбайнов транспортными средствами — пример замкнутой системы.

Кроме того, системы различают по числу обслуживающих каналов (приборов) — *одноканальные* и *многоканальные*, и по поведению заявки — *с отказами* и *с ожиданием*.

**Сущность метода.** Описывают возможное состояние системы с использованием геометрической схемы, так называемого графа состояния. При этом принимается во внимание, что система относится к дискретному виду. Если процесс случаен и может быть отнесен к марковскому, т. е. такому, когда для любого момента времени  $t_0$  вероятностные характеристики процесса в будущем зависят только от его состояния в  $t_0$  и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние, то уравнениями описывают все вероятности  $P_i(t)$  как функции времени. Из уравнений для установившегося режима определяют: вероятность того, что свободны все каналы, вероятность того, что занято  $K$  каналов, вероятность отказа, число заявок, находящихся в очереди, среднюю продолжительность простоя заявки в очереди.

Большинство зависимостей в теории массового обслуживания выведено в предположении простейшего потока заявок и показательного распределения продолжительности обслуживания одной заявки.

Под простейшим потоком заявок понимается поток, обладающий следующими тремя свойствами: стационарностью, отсутствием последствия, ординарностью.

*Стационарность потока* означает, что вероятность появления того или иного числа событий за определенный отрезок времени зависит только от размера этого

отрезка и не зависит от местоположения его на временной оси, т. е. от начала отсчета.

*Отсутствие последствия* означает, что события за выбранный нами период не зависят от событий, возникающих в другие периоды.

*Ординарность потока* означает, что вероятность появления двух или более событий в течение небольшого отрезка времени ничтожно мала по сравнению с появлением одного события.

Порядок проведения исследований таков. Составляют принципиальную схему обслуживания, в которой указывают порядок поступления заявок на обслуживание, принятую схему обслуживания и возвращение обслуженной заявки в систему.

Ведут наблюдения за обслуживанием; определяют плотность или интенсивность потока заявок  $\lambda$ , т. е. среднее их число, приходящееся на единицу времени (конечно, можно определить интервал появления события), и устанавливают закон появления интервалов события.

Проводят наблюдения за продолжительностью обслуживания; устанавливают параметр  $\mu$  (величина, обратная среднему времени обслуживания одной заявки) и закон распределения времени обслуживания.

Определяют тип системы (разомкнутая, замкнутая, с ожиданием или отказом) и подбирают математическую модель.

Получают несколько зависимостей или оценок, анализируют их, а также разрабатывают пути совершенствования работы системы.

Если поток заявок простейший (пуассоновский), а поток времени обслуживания показательный, то для заданной системы рассчитывают необходимые показатели: вероятностные состояния системы, простои, коэффициенты загрузки и т. д.

Теория массового обслуживания решает задачи не только применительно к простейшему потоку, но довести математическое описание до явных, аналитических формул удалось лишь для простейших потоков событий (поток заявок, поток обслуживания). Когда потоки не простейшие, то марковская теория массового обслуживания позволяет дать приближенное решение, что устраивает часто практику. К тому же в некоторых случаях удается получить точное решение. Но для любого потока заявок и времени обслуживания, при любой дис-

циплине обслуживания справедливы уравнения Литлла

$$W_c = \frac{1}{\lambda} L_c;$$

$$W_{оч} = \frac{1}{\lambda} L_{оч},$$

где  $W_c$  — среднее время пребывания заявки в системе;  $L_c$  — среднее число заявок в системе (обслуживаемых и находящихся в очереди);  $W_{оч}$  — среднее время пребывания заявки в очереди;  $L_{оч}$  — среднее число заявок в очереди.

Многие реальные потоки в проблемах, связанных с сельскохозяйственной техникой, не являются стационарными. Так, продолжительность наполнения бункера в течение суток не остается постоянной (в утренние и вечерние часы она возрастает). Также налицо последствие — интервал выдачи наполненных бункеров, например, зависит от своевременности обслуживания транспортными средствами. В ряде случаев «массовость» невелика и ошибка при округлении потребного количества технических средств превосходит точность расчета. Поэтому на данном этапе исследователи не доказывают, а скорее принимают, что поток простейший, и рассчитывают соответствующие характеристики.

При использовании сельскохозяйственной техники встречаются разомкнутые системы, но наибольшее распространение имеют замкнутые. С первыми сталкиваются, когда машина работает при так называемых внехозяйственных перевозках и, как правило, это система с ожиданием.

Решение практических задач замкнутой системы сложно. Но описание системы несколько упрощается благодаря установленной К. Пальма зависимости вероятностных состояний системы, а также наличию соответствующих расчетных таблиц. Расчетные формулы, их вывод, а также пример расчета приведены в литературе [35, 76 и др.].

Отметим также и то, что основные уравнения теории массового обслуживания выведены для установившихся режимов функционирования систем. Но во многих задачах, связанных с проектированием производственных сельскохозяйственных процессов в растениеводстве, такие режимы практически не наблюдаются.

Вследствие этого, а также с учетом малой «массовости» следует обратить внимание читателей на появив-



шиеся в последнее время приближенные методы теории массового обслуживания [41].

**Наиболее часто встречающиеся задачи следующие:**  
определить программу и потребное количество оборудования пункта технического обслуживания и диагностики;

определить, сколько нужно рабочих для обслуживания группы станков или машин;

рассчитать, какое соотношение машин должно быть в различных звеньях производственного процесса (комбайнов, посевных машин, транспортных средств, погрузчиков и т. д.);

рассчитать простой и производительность машин и оборудования в отдельных звеньях производственного процесса при известном их количестве;

рассчитать вместимость накопителя-компенсатора.

## **7. Статистическое моделирование**

**Общее понятие.** Статистическое моделирование, или метод Монте-Карло, используется для решения как вероятностных задач с постановкой, полностью совпадающей с задачами, рассмотренными в теории массового обслуживания, так и других (например, вычисление значения определенного интеграла). Здесь рассмотрены только первые.

Идея метода сводится к тому, что проводится «розыгрыш» случайного явления по специально разработанной процедуре, при этом каждый раз получается новая реализация, отличная от других. Такая реализация будет отличаться от реализации в действительном процессе. Но так как таких реализаций получают очень много, то накопленная статистика в значительной степени приближается к статистике действительного процесса. Это машинный метод, которому присуща универсальность. Максимум работы переносится на машину. Используя этот метод, можно натурные эксперименты заменить моделированием (проигрыванием на ЭВМ), что обеспечивает большую экономию. Как отмечалось, теория массового обслуживания имеет аналитические зависимости только для простейших потоков заявок. Однако в реальных системах интервал между двумя последовательными требованиями, а также время обслуживания часто не подчиняются показательному распределению, и здесь получить аналитическое решение

удается редко. Более того, многие системы при их функционировании создают непреодолимые препятствия к получению научных решений методами теории массового обслуживания. Так, расчет показателей функционирования такой казалось бы простой системы, как уборка урожая комбайнами, транспортирование, взвешивание, выполняется с большим трудом, да и то с множеством допущений.

Для решения задач методами статистического моделирования необходимо прежде всего знать законы распределения промежутков времени между поступлением двух последовательных требований и продолжительности обслуживания. Чаще всего с этой целью проводится хронометраж.

Зная закон распределения интервалов поступления заявок и их обслуживания, описывают возможные состояния системы и условия перехода из одного состояния в другое. Так, в примере с комбайнами такими состояниями будут: подготовка к работе, работа, устранение технологических отказов (очистка и регулировка рабочих органов, натяжение ремней), устранение технических неисправностей, ожидание транспортных средств. Для транспортных средств: подготовка к работе, загрузка, груженный проезд по полю, проезд по дорогам, взвешивание, разгрузка, проезд вхолостую по дороге и по полю, ожидание разгрузки.

Затем определяют необходимые операторы, характеризующие последовательные состояния системы. После этого записывают операторную схему алгоритма. Для наглядности представляют блок-схему моделирующего алгоритма, соответствующую операторной схеме. Началу моделирования предшествуют указания о начальных условиях, а также границы интервалов исследуемого процесса.

По принятому алгоритму проводят проигрывание на ЭВМ. По результатам проигрывания определяют необходимые показатели и характеристики (например, для определенного числа комбайнов, но при разном числе транспортных средств — среднее время простоя комбайнов и транспортных средств). На основании характеристик легко рассчитать производительность машин, приведенные затраты средств в зависимости от числа транспортных средств. Следовательно, найти оптимальный вариант.

**Круг задач, решаемых методом статистического моделирования, очень большой. Прежде всего это задачи массового обслуживания; расчет надежности изделия и др.**

Этот метод предпочтителен не только при решении задач, связанных со сложными системами, состоящими из ряда подсистем (например, погрузка, транспортирование и перегрузка навоза через эстакаду в навозоразбрасыватель, распределение его по полю), в которых случайные факторы сложно переплетаются, но и для проверки точности расчета и применимости аналитических зависимостей, установленных ТМО. Однако следует иметь в виду, что статистические методы громоздки и требуют много машинного времени. При проектировании производственных процессов в сельском хозяйстве созданные производственные линии действуют непродолжительное время — линии приходится создавать применительно к каждому полю. Использование в таких условиях статистических методов связано с большим количеством реализаций, а это затруднительно и дорого. Поэтому в тех случаях, когда мы сталкиваемся с отличными от простейших потоками, следует расчеты вести приближенными методами теории массового обслуживания, а точность расчета и применимость аналитических зависимостей проверять статистическими методами. После этого наиболее распространенные процессы надо свести к отдельным группам (моделям) и расчеты вести по установленным аналитическим зависимостям, уже не прибегая к статистическим методам.

## **8. Математические методы программирования**

К математическим методам программирования относятся: линейное, выпуклое и динамическое программирования.

**Линейное программирование.** В крупном механизированном сельскохозяйственном производстве возникает ряд производственных задач с распределением чего-нибудь.

Например, хозяйство располагает в определенном количестве тракторами разных марок и прицепными машинами к ним. Предстоит выполнить ряд операций в определенный период (посев, уборка и т. д.). Возникает задача, как распределить тракторные агрегаты по вы-

полнению отдельных операций с тем, чтобы получить наибольший эффект?

Или другой пример. Имеются различные транспортные средства и предстоит перевезти грузы из нескольких точек в ряд приемных пунктов; необходимо решить, какими должны быть маршруты, какие транспортные средства закрепить за точками с тем, чтобы получить минимум денежных затрат? Говоря обобщенно, возникает задача наилучшего использования производственных возможностей или ресурсов. Такие задачи решаются методами линейного программирования.

При этом четко формулируют критерии, т. е. меру соответствия полученных решений поставленной цели. Целевая функция описывается линейным уравнением, переменные которой подчинены определенным ограничениям, представленным также в линейной форме. При этом число неизвестных  $k$  превосходит число уравнений  $l$ .

Математическое линейное программирование сводится к отысканию неотрицательных решений неопределенных  $l < k$  систем линейных уравнений. Способ нахождения решения неопределенных систем состоит в приведении их к определенным системам, содержащим столько неизвестных, сколько имеется уравнений. Для уяснения существа метода приведем простейший пример.

Колхозу предстоит в весенний период выполнить ряд работ с объемом  $V_1, V_2, \dots, V_m$ ; хозяйство располагает  $z_j$  агрегатами с выработкой  $\Omega_{ij}$ —сменной выработкой на  $i$ -той операции одного  $j$ -агрегата. За критерий принимаем срок проведения всех работ. При этом каждый агрегат должен быть занят одинаковый период. Обозначим  $X_{ij}$ —количество смен, отработанных на  $i$ -той работе всеми агрегатами  $j$ -той марки. Тогда ставится задача найти минимум целевой функции

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \rightarrow \min.$$

Ранее говорилось, что решения даются только неотрицательные. Из этого вытекает первое ограничение

$$X_{ij} \geq 0.$$

В условиях сказано, что должен быть выполнен весь запланированный объем работ, из чего вытекают ограничения:

$$\sum_{j=1}^n \Omega_{ij} X_{ij} = V_i;$$

$$\sum_{j=1}^n \Omega_{2j} X_{2j} = V_2;$$

. . . . .

$$\sum_{j=1}^n \Omega_{mj} X_{mj} = V_m.$$

Агрегаты должны быть заняты одинаковый период, что записывается в виде ограничения

$$\sum_{i=1}^m X_{i1}/z_1 = \sum_{i=1}^m X_{i2}/z_2 = \dots = \sum_{i=1}^m X_{in}/z_n.$$

Решение подобных задач возможно в основном только на ЭВМ. Правда, некоторые простые задачи могут быть решены и ручным способом. Для решения задач линейного программирования разработано много методов, из которых наибольшее распространение получил симплексный. Алгоритмы решения подобных задач широко освещены в математической и экономической литературе.

Кроме ранее перечисленных примеров, линейное программирование нашло широкое распространение при определении оптимального оснащения производства сельскохозяйственной техникой, при распределении ремонтных работ между станками, для установления животным рационов, обеспечивающих использование кормов с наибольшей отдачей; для раскроя листового материала с наименьшими отходами, при сетевом и календарном планировании и т. д.

**Динамическое программирование.** Встречаются задачи, которые по целевой функции и ограничениям близки к линейному программированию, но отличаются от него. Это те, где надо отыскать максимум нелинейной целевой функции при определенных ограничениях. Общих способов решения таких задач нет, а есть способы, учитывающие вид функций [11, 37]. Пусть надо выполнить операцию, состоящую из  $m$  шагов, каждый из которых характеризуется показателем  $K_i$  (выигрышем). Общий выигрыш за всю операцию равен сумме выигрышей на каждом шаге. При этом, разумеется, мы имеем возможность изменять параметры, т. е. управлять процессом.

На каждом шаге принимаются такие решения (шаговое управление), от которых зависит выигрыш как

на данном шаге, так и за операцию в целом. Требуется найти такое управление, при котором выигрыш  $K$  обращается в максимум, т. е.

$$K_{об} = \sum_{i=1}^n K_i \rightarrow \max,$$

где  $K_i$  — выигрыш на  $i$ -том шаге.

Динамическое программирование применяется при решении задач замены оборудования, сельскохозяйственной техники. Пусть на содержание техники выделяется определенная сумма денежных средств и надо решить, что целесообразнее, вложить их в новую технику или потратить на ремонт старой. Конечно, если вложить средства в новую технику, то в первый год выигрыш будет небольшой, но зато в последующие годы он значительно возрастет. Если израсходовать деньги на ремонт техники, то, наоборот, выигрыш в первый год будет большой, а в последующие он уменьшится.

Как расходовать средства каждый год с тем, чтобы за несколько лет получить максимальный выигрыш, можно решить методами динамического программирования.

**Выпуклое программирование** является промежуточным между линейным и динамическим.

## 9. Теория эксперимента

**Основные понятия.** При традиционном (классическом) плане проведения многофакторного эксперимента всем независимым переменным, кроме одной, придается постоянное значение. Переменную изменяют, придавая различные значения (варьируя уровнем) во всем интервале изменений, и по результатам эксперимента находят  $y=f(x)$ . Затем придают различные значения следующей переменной (например,  $z$ ) при постоянном значении остальных и находят  $y=f_1(z)$ .

Так поступают со всеми независимыми переменными. После чего устанавливают зависимость  $y=\varphi(x, z, \dots)$ .

Таким образом, многофакторный эксперимент проводят в такой же последовательности, как и однофакторный. Как правило, при этом берут небольшое число факторов (чаще всего не больше трех).

В сложных ситуациях одновременно действует большое количество факторов, значения которых во времени не остаются постоянными. Если изучение провести по схеме однофакторного эксперимента, то необходимо проделать очень большое число опытов, что не только трудоемко, но и дорого. Практически же часто из-за кратковременности выполнения производственных процессов это не представляется возможным. Более того, представляется весьма затруднительным осмыслить результаты опытов.

Число опытов  $N$  при одинаковом числе уровней всех факторов в классическом эксперименте (без учета повторения опытов), как известно, может быть определено по формуле

$$N = P^n, \quad (\text{III.5})$$

где  $n$  — число факторов;  $P$  — число уровней, т. е. возможных значений аргументов, для которых надо определить значение функции.

Так, если  $n=3$  и  $P=5$ , то  $N=5^3=125$ .

В том случае, когда на объект действует большое число факторов, когда входные воздействия многообразны и необходимо знать результаты этих воздействий на выходные показатели, знать реакцию системы на них, прибегают к теории эксперимента. При этом используют понятие «черного ящика» — системы, в которой известны входные и выходные значения величин, но неизвестно внутреннее устройство или взаимосвязи между параметрами  $\Pi_i$  (см. рис. 2). Такой эксперимент называют факторным.

Входные воздействия принято называть *факторами*, а реакцию на них — *откликом*. Значение отклика характеризуется изменением (приращением) соответствующего выходного показателя или, как часто говорят, параметра при изменении фактора. Этот параметр часто оптимизируется, и его называют *параметром оптимизации*. Уравнение, связывающее параметр оптимизации с факторами, называют *функцией отклика*, а геометрическое ее представление — *поверхностью отклика*. Например, исследователя интересует, как изменяется устойчивость движения (сохранение заданной траектории) машинно-тракторного агрегата в зависимости от параметров оптимизации: давления воздуха в камерах колес, развала и сходимости управляемых колес, точки при-

ложения нагрузки, осевого зазора рулевого колеса и т. д. В таком случае прибегают к факторному эксперименту.

**Особенности факторного эксперимента** таковы:

проведение эксперимента по заранее намеченной стратегии исследования;

задание вида математической модели (формальной) до проведения эксперимента, а в ходе его определение только необходимых коэффициентов;

проведение экспериментов, как правило, только на двух уровнях факторов: нижнем ( $-1$ ) и верхнем ( $+1$ ) или сокращенно  $-$ ,  $+$  уровнях, что позволяет значительно уменьшить объем экспериментальной и вычислительной работы;

варьирование по специальному алгоритму сразу несколькими, а не одним фактором, что также сокращает объем эксперимента без потери точности;

возможность управлять экспериментом, т. е. изменять тактику в зависимости от полученных результатов при проведении эксперимента, в то время как в однофакторном эксперименте новую тактику можно наметить и выполнить только после завершения эксперимента, при его повторении;

оценка ошибки опытов, что дает возможность судить о значимости действия факторов.

При факторном эксперименте устанавливают количественные зависимости между параметрами оптимизации и факторами (интерполяционные зависимости). Он позволяет находить значения факторов, при которых параметры оптимизации достигают минимума или максимума.

Факторов может быть много, среди них находятся определяющие и малозначащие. Разработаны специальные приемы для отсеивания малозначащих факторов, что дает возможность сократить число опытов. Для быстрого отыскания максимума или минимума оптимизируемых параметров разработаны специальные методы, например метод крутого восхождения. Но этим методом находят не только точку максимума или минимума, но и локальное описание поверхности отклика, т. е. описание оптимальной области. Большинство опытов, связанных с работой мобильных машинных агрегатов в поле, не представляется возможным провести без многофакторного эксперимента.



Математическая модель объекта исследования, связывающая параметры оптимизации с факторами, является функцией отклика. Функция отклика представляет собой уравнение многомерной поверхности, называемой поверхностью отклика, на которой необходимо найти точку, соответствующую максимуму или минимуму функции. Эта функция должна быть монотонной, неразрывной; поверхность отклика должна иметь только одну экстремальную точку, соответствовать требованиям регрессионного анализа.

Параметры оптимизации (их часто называют критериями эффективности) выбирает исследователь. Параметров оптимизации может быть много. Однако возможна оптимизация только одного параметра.

Пока успешно решаются задачи, в которых один параметр оптимизируется, а другому даются ограничения. Если число факторов не превышает трех, то применяют полный факторный эксперимент; при числе факторов от трех до пятнадцати используют дробные реплики. Если число факторов превышает 15, то несущественные факторы отсеивают.

**Полный факторный эксперимент** сводится к следующему: выбор математической модели, построение плана, расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости, анализ решений.

Функция отклика чаще всего задается уравнением регрессии вида

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i>j} b_{ij} X_i X_j, \quad (\text{III.6})$$

где  $X_i$ ,  $X_j$  — значение факторов;  $b_0$  — свободный член;  $b_i$  — коэффициент регрессии факторов;  $b_{ij}$  — коэффициент регрессии факторов двойного взаимодействия.

Эта запись для трехфакторного эксперимента выглядит так:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + \\ + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3.$$

Коэффициенты регрессии рассчитывают по результатам эксперимента. Чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор.

Знак при коэффициенте указывает на направление изменения функции: «плюс» — на увеличение, «минус» —

на уменьшение. Если математическая модель, принятая на первом этапе эксперимента и представленная линейной зависимостью (III.6) при принятых интервалах варьирования плохо описывает процесс, то ее заменяют на квадратическую модель вида

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i>j}^n b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2. \quad (\text{III.7})$$

При составлении плана эксперимента выбирают уровни варьирования факторов, причем при количественных факторах их уровни берут, исходя из практических применений. При качественных факторах их кодируют (условно нумеруют). В факторных экспериментах опыты ставят так, чтобы уровни одного фактора сочетались с уровнями других, составляют матрицу планирования эксперимента (табл. 1), где строки соответствуют разным опытам, а столбцы — значениям факторов.

Таблица 1. Матрица планирования двухфакторного эксперимента (типа  $2^2$ )

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_1 X_2$ | Вектор выхода |          |          | Среднее значение |
|---------|-------|-------|-------|-----------|---------------|----------|----------|------------------|
|         |       |       |       |           | Повторности   |          |          |                  |
|         |       |       |       |           | $Y_1$         | $Y_2$    | $Y_3$    |                  |
| 1       | +     | —     | —     | +         | $Y_{11}$      | $Y_{12}$ | $Y_{13}$ | $Y_{ср1}$        |
| 2       | +     | +     | —     | —         | $Y_{21}$      | $Y_{22}$ | $Y_{23}$ | $Y_{ср2}$        |
| 3       | +     | —     | +     | —         | $Y_{31}$      | $Y_{32}$ | $Y_{33}$ | $Y_{ср3}$        |
| 4       | +     | +     | +     | +         | $Y_{41}$      | $Y_{42}$ | $Y_{43}$ | $Y_{ср4}$        |

Матрицу для трех независимых переменных (табл. 2) можно получить, воспользовавшись матрицей для двух переменных, повторив ее один раз при значении  $X_i$ , находящемся на нижнем уровне, а другой раз — на верхнем. При этом элементы матрицы двухфакторного эксперимента умножают на третий фактор.

Для получения матрицы четырех факторов необходимо элементы матрицы для трех факторов перемножить на четвертый, взятый на двух уровнях. Это правило можно распространить на любое число факторов.

Чтобы поставить различные варианты в сопоставимые условия, исключают предпочтение, отдаваемое исследователем желаемому варианту, широко практикуется рандомизация. Это особенно важно для неоднородных условий, т. е. для полевых опытов.

Т а б л и ц а 2. Матрица планирования трехфакторного эксперимента

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_1X_2$ | $X_1X_3$ | $X_2X_3$ | $X_1X_2X_3$ | Кодовое обозначение строк | Вектор выхода |
|---------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-------------|---------------------------|---------------|
|         |       |       |       |       |          |          |          |             |                           | $Y_{cp}$      |
| 1       | +     | —     | —     | —     | +        | +        | +        | —           | (1)                       | $Y_{cp1}$     |
| 2       | +     | +     | —     | —     | —        | —        | +        | +           | $a$                       | $Y_{cp2}$     |
| 3       | +     | —     | +     | —     | —        | +        | —        | +           | $b$                       | $Y_{cp3}$     |
| 4       | +     | +     | +     | —     | +        | —        | —        | —           | $ab$                      | $Y_{cp4}$     |
| 5       | +     | —     | +     | +     | —        | —        | +        | —           | $c$                       | $Y_{cp5}$     |
| 6       | +     | +     | —     | +     | —        | +        | —        | —           | $ac$                      | $Y_{cp6}$     |
| 7       | +     | —     | +     | +     | —        | —        | +        | —           | $bc$                      | $Y_{cp7}$     |
| 8       | +     | +     | +     | +     | +        | +        | +        | +           | $abc$                     | $Y_{cp8}$     |

**Рандомизация** — чередование опытов в случайном порядке, установленном либо по таблицам случайных чисел, либо способом жеребьевки и т. п.

При определении количества повторностей опыта руководствуются следующими величинами: надежностью опыта или доверительной вероятностью и допускаемой ошибкой, выраженной в долях среднеквадратической ошибки, т. е. вероятностью того, что значение измеряемой величины не выйдет за доверительные пределы.

Как доверительную вероятность, так и допускаемую ошибку устанавливает сам исследователь, исходя из сущности процесса и необходимой точности последующих расчетов. В технических расчетах доверительную вероятность чаще всего принимают от 0,7 до 0,9. После проведения опытов подсчитывают коэффициенты регрессии принятой модели и оценивают их значимость, а также проверяют воспроизводимость модели.

**Расчет коэффициентов регрессии** выполняется в такой последовательности:

свободный член определяют по формуле

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N Y_{cpu}}{N}; \quad (\text{III.8})$$

линейные члены находят из выражения

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_{cpu}}{N}, \quad i=0, 1, 2, \dots, n; \quad (\text{III.9})$$

члены смешанных взаимодействий определяют так:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} X_{ju} Y_{срu}}{N}, j=0, 1, 2, \dots, n, \quad (\text{III.10})$$

где  $Y_{ср}$  — среднее арифметическое значение выходного параметра для одного опыта (варианта) при  $m$  повторностях опыта;  $N$  — количество опытов;  $X_{iu}$  — значение факторов  $X_i$  в  $u$ -том опыте;  $X_{iu}, X_{ju}$  — значение двух факторов в  $u$ -том опыте.

Коэффициент регрессии считается значимым, если его абсолютное значение превышает абсолютное значение доверительного интервала, который для всех коэффициентов одинаков. Значимость коэффициентов регрессии проверяют путем определения критерия Стьюдента и сопоставления его с табличными значениями.

О воспроизводимости модели судят по ошибке опыта. Проводят параллельные опыты и рассчитывают дисперсию. Дисперсии в параллельных опытах в точках плана должны быть сравнимы, т. е.

$$\sigma^2(Y_1) = \sigma^2(Y_2) = \dots = \sigma^2(Y_n).$$

Однородность (равноточность) проверяют по критерию Кохрена сопоставлением найденного значения с табличным. Условие однородности опытов предполагает примерно одинаковое влияние ошибок и случайных помех по всем точкам в матрице планирования. Такая проверка особенно важна при экстремальных экспериментах. Зная ошибку опыта и коэффициент регрессии, проверяют адекватность полученной модели, т. е. возможность описания процесса линейной моделью, чаще всего по критерию Фишера ( $F$ -критерий). Опять же сравнивают рассчитанный критерий по экспериментальным данным с табличным. Помимо этого, существует и ряд других приемов для определения адекватности модели.

**Дробные реплики.** Когда повторяется лишь часть эксперимента, план называют дробной репликой или планом дробного факторного эксперимента. Он применяется в следующих случаях:

при описании процессов, где по сущности решаемых задач не может быть некоторых взаимодействий факторов (хотя бы некоторых парных взаимодействий);

при локальном описании небольших участков поверхности отклика полиномом первой степени;

как правило, при числе факторов более трех.

Для экспериментов с варьированием факторов на двух уровнях используются регулярные дробные реплики:  $\frac{1}{2}$  реплики, или полуреплики, а также  $\frac{1}{4}$ ;  $\frac{1}{8}$ ;  $\frac{1}{16}$  и т. д. реплик.

Дробный факторный эксперимент позволяет сократить число опытов, однако при этом сохраняются оптимальные свойства матрицы и при меньшем числе наблюдений объем полученной информации изменяется незначительно.

В основу дробных реплик положен эффект фактора, под которым понимается изменение отклика при разных уровнях изучаемого фактора. Между двумя факторами  $X_1$  и  $X_2$  существует взаимодействие, если эффект от одного фактора (например,  $X_1$ ) будет зависеть от того, на нижнем или верхнем уровне находится другой фактор (например,  $X_2$ ). Взаимодействие факторов можно рассматривать как новый фактор, который дает прибавку к отклику.

**Методы оптимизации процесса при факторном эксперименте.** Оптимизация процесса — описание при помощи уравнения поверхности отклика. Особое значение имеет изучение факторного пространства в окрестностях опыта. Оптимизации должно предшествовать отсеивание малозначащих факторов. Наиболее распространенным является метод крутого восхождения по поверхности отклика в направлении градиента, под которым разумеют наибольшую скорость изменения функции.

При этом методе движение к экстремальной точке разбивают на ряд последовательных шагов и стратегию эксперимента изменяют в соответствии с полученными результатами в предшествующем шаге. После каждого этапа необходима тщательная обработка результатов опыта.

На первом этапе ставят небольшую серию экспериментов с тем, чтобы выявить значимость отдельных факторов (отсеивающие эксперименты) и отсеять малозначащие. После этого на основе небольшого числа опытов определяют направление движения к оптимальной точке, находящейся на поверхности отклика. Затем, двигаясь к оптимальной точке, определяют место нахождения оптимума или точки, близкой к оптимальной. Если два-три опыта крутого восхождения не дают лучших результатов, то движение по градиенту прекращают по-

тому, что линейное приближение поверхности отклика становится недостаточным из-за достижения почти стационарной области. После этого либо заканчивают эксперимент, либо область описывают уравнениями второго порядка. Поверхности отклика второго порядка исследуют несколькими способами, например приводят уравнения к «каюническому» виду.

Теория планирования эксперимента, как известно, сочетается с методами теории подобия и анализа размерностей. При этом между независимыми факторами с помощью теории подобия и анализа размерностей устанавливают связь в критериальной форме, что позволяет сократить число независимых переменных и раскрыть физическую сущность изучаемого явления. Затем матрицу эксперимента формируют так, что в качестве независимых переменных  $X_1, X_2, \dots, X_k$  рассматривают критерии подобия  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$ , определяющие изучаемый процесс [77].

## 10. Системный подход

**Понятие системы.** Под системой обычно понимают множество элементов, соединенных между собой таким образом, что работа системы обусловлена взаимодействиями отдельных элементов, и, наоборот, действия элементов определяются работой системы (машинно-тракторный агрегат; процесс уборки, например, зерновых культур, где взаимодействуют комбайны с транспортными средствами, с зерноочистительными машинами; совхоз или колхоз; отрасль целиком). Системы могут быть большими и малыми, простыми и сложными.

Системный подход появился в результате открытия кибернетикой сходства и общности принципов взаимодействия систем в технике, биологии, экономике и т. д.

Структурная аналогия процессов в разных областях материального мира позволяет в изучаемой области воссоздавать процессы аналогичные процессам, реально протекающим и хорошо изученным в других областях. Аналогии часто наблюдаются между очень отдаленными областями. Так, аналоговые или моделирующие машины построены по аналогии с социально-экономическими процессами, и, наоборот, некоторые проблемы расширенного воспроизводства решаются с помощью гидравлического устройства. Общие принципы функционирования

систем использованы при создании электронных цифровых и аналоговых машин.

В чем же специфика системного изучения? Это прежде всего в новом принципе подхода к объекту изучения, новой ориентации всего движения исследователя, в стремлении построить целостную картину объекта.

Системный подход или системотехнику чаще всего применяют для сложных систем, таких, как системы автоматизированного управления, крупные производственные комплексы — комплексы по уборке зерновых культур, посевные комплексы и др.

Сложная система представляет собой совокупность отдельных звеньев, которые работают в тесном взаимодействии, представляя собой как бы единое целое для выполнения определенной задачи. Но целостность объекта рассматривалась задолго до появления системного подхода, это свойство обязательное и как бы само по себе разумеющееся. Для системного подхода важны: состав объекта, свойства его элементов, в том числе и характер их взаимодействия.

Для комплексов, объектов большого масштаба наибольшее значение имеет не физическая или химическая сущность процесса, а структура системы, взаимодействие между отдельными частями и внешней стороной, централизация управления различными средствами.

Объект целесообразно рассматривать как сложную систему в том случае, когда другими, более простыми методами изучить ее нельзя и если вопросы в значительной степени носят общесистемный характер. Сбор, передача и переработка информации, осуществляемые специальными средствами, называется управлением, и ему в сложных системах отводится очень важная роль. Средствами управления часто являются цифровые вычислительные машины, в задачу которых входит обработка информации, планирование и оперативное управление сложными системами с использованием управляющих алгоритмов.

Часто используются системы с иерархической структурой, где управление разделяется последовательно на несколько частей или, как их называют, уровней. При этом основная масса информации перерабатывается в системах низшего уровня. В высшие уровни поступают только те данные, которые характеризуют подсистемы сложной системы. Примером таких систем может быть

административное управление посевными работами — низшим уровнем будут звенья, затем посевные комплексы, более высоким — управление в рамках колхоза и совхоза и, наконец, еще более высоким — управление в рамках района.

Многим сложным системам присуща самоорганизация. Самоорганизующиеся системы на основании оценки воздействия внешней среды последовательно изменяют свои свойства, приходят к устойчивому состоянию, если воздействия внешней среды находятся в допустимых пределах.

К факторам воздействия внешней среды относятся: погодные условия, состояние рельефа, всевозможные изменения нагрузки и т. д. Эти факторы нестабильны, они носят случайный характер в вероятностно-статистическом смысле. Как внешние, так и внутренние случайные воздействия влияют на режим работы элементов системы и могут существенно изменить работу всей системы. Воздействие внешней среды и внутренние воздействия (между элементами) не остаются постоянными, имеется рассеяние (разброс) этих воздействий, в результате чего наблюдается не только рассеяние результатов работы системы, но и изменения средних значений показателей ее работы (например, производительности, сроков проведения работ, денежных затрат, уровня рентабельности).

Признаки сложных систем выделяют следующие:

- большое число взаимосвязанных и взаимодействующих элементов;

- выполнение системой сложных задач для достижения заданной цели;

- наличие в системе подсистем, выполняющих общую задачу, стоящую перед системой;

- наличие управления;

- взаимодействие при работе с внешней средой в условиях воздействия случайных факторов.

При исследовании сложных систем решаются две задачи: анализа и синтеза.

При анализе должны быть известны структура системы и значения всех ее параметров, требуется вычислить значения показателей работы этой системы и определить зависимость их от разных параметров при известных начальных условиях и условиях работы, а также оценить устойчивость системы. Имеется масса примеров решения подобных задач.



*При синтезе* известны показатели эффективности, а требуется определить структуру и оптимальные параметры системы.

Задачи синтеза решают, как правило, путем перебора возможных вариантов («синтез через синтез»). При этом намечают «первоначальный» вариант системы (структура и параметры) и для него определяют показатели эффективности. Затем берут другой вариант, и так до тех пор перебирают варианты, пока не будет найден оптимальный.

Для сложной системы в целом математическую модель построить не представляется возможным — так сложно ее функционирование. Поэтому сложную систему расчлняют на конечное число подсистем, где каждая из них поддается математическому описанию.

Математическая модель сложной системы представлена двумя частями: математической моделью отдельных элементов системы и математической моделью взаимодействия между элементами. С математической моделью отдельных элементов в исследованиях по механизации сельского хозяйства приходится сталкиваться довольно часто. Более новым является взаимодействие отдельных элементов. Взаимные действия отдельных элементов или воздействие каждого элемента на другие элементы сложной системы рассматриваются как обмен сигналами. Взаимодействие сложной системы с внешней средой сводится также к обмену сигналами. Построение математической модели отдельных элементов системы и математической модели взаимодействия нельзя отрывать друг от друга — это единый процесс.

**Для системного подхода характерно следующее:**

описание элемента ведется с учетом его места в системе, а не изолированно и не носит самодовлеющего характера;

система представляется как иерархическое строение, где указываются взаимосвязи различных уровней (плоскостей) элементов системы, а реализация этой связи представляется в виде уравнений;

по возможности наиболее полно описываются условия существования системы;

свойства характеристик системы вытекают, порождаются свойствами элементов, и, наоборот, свойства элементов определяются характеристиками целого;

объяснение функционирования и развития объекта не всегда может быть чисто причинным;

источник преобразования системы или ее функции лежит в самой системе. Для большого класса систем характерна целесообразность поведения, что не всегда связано причинно-следственными зависимостями.

Системный подход чаще всего используется в организации крупного производства и управления им. Но и в механизации сельскохозяйственных производственных процессов он уже нашел применение, например, при изучении и совершенствовании механизированных процессов уборки сахарной свеклы и испытании сельскохозяйственной техники. При изучении вопросов механизации сельского хозяйства часто прибегают к иерархической структуре системы с тем, чтобы установить возможные взаимосвязи в системе и не пропустить какую-нибудь из них, а затем подсистему рассматривают самостоятельно традиционными методами. При этом следует иметь в виду, что оптимальное решение для отдельного элемента не будет в общем случае оптимальным для системы. Так, оптимальное решение для двигателя не будет оптимальным для трактора, а последнее не будет оптимальным для агрегата.

Системный подход найдет применение в ближайшем будущем:

- при обосновании и прогнозировании оптимальных параметров различных средств механизации в том случае, когда одни и те же средства предназначены для работы в крупном регионе или тем более во многих зонах страны;

- при обосновании типажа сельскохозяйственной техники, применительно к той или иной зоне;

- при разработке теории машиноиспользования, где важно установить нормативные величины технико-экономических показателей, а также значения технологических и других допусков;

- при разработке вопросов инженерной службы;

- при разработке методов рациональной эксплуатации машин и комплексов.

## 11. Метод аналогий

Сущность метода аналогий — использование сходства признаков или отношений между исследуемым явлением и другим, имеющим разработанную и проверенную

теорию. Используя этот метод, всегда нужно иметь в виду, что внешнее сходство, подобие явлений не всегда свидетельствуют о сходстве их математических моделей.

Примером использования аналогий является решение В. П. Горячкиным задачи о сопротивлении плуга (см. гл. I, стр. 33).

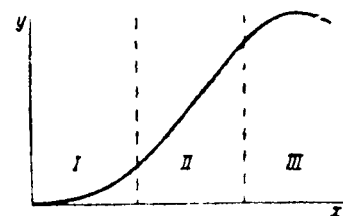


Рис. 5. Кривая развития явлений.

Другой пример: очень много явлений, процессов развивается по интегральной кривой (рис. 5). В зоне I развитие идет с ускорением, т. е.  $j > 0$ , в зоне II — по инерции, т. е.  $j = 0$ , в зоне III — с замедлением, т. е.  $j < 0$ .

Общим признаком для многих из таких процессов является накопление чего-либо. Примером аналогичных процессов могут служить следующие:

| За X принято:                                      | За Y принято:                                  |
|--|--|
| Время  | Накопление урожая (массы растений)             |
| Время (смены)                                      | Выработка                                      |
| Возраст человека                                   | Физические и творческие способности его        |
| Время (существования нового принципа работы машин) | Производительность машин, использующих принцип |
| Энергонасыщенность                                 | Урожайность                                    |
| Время (существования метода исследования)          | Выпуск литературы о методе                     |

Круг задач, решаемых методом аналогий, очень широк. Четко ограничить его практически невозможно.

## 12. Метод экстраполяции

В главе I говорилось об экстраполяции как о принципе научного мышления, здесь же пойдет речь об экстраполяции в более узком смысле. Экстраполяция представляет собой распространение экспериментально полученных зависимостей (аналитических или графических) за пределы значений аргумента, который был принят при их установлении.

Экстраполяция — метод, при котором принимается, что развитие процесса во времени или изменение пока-

зателя с изменением основного параметра будет наблюдаться по тем же законам, по которым оно шло до момента изучения. Экстраполируются как описательные тенденции, так и статистические закономерности. Чаше всего этот метод применяется для прогноза технического состояния узлов, агрегатов с целью определения достаточного ресурса или необходимых технических воздействий. Кроме того, он применяется для прогнозирования технических характеристик машин, например для определения массы зерноуборочного комбайна в связи с предполагаемым изменением его пропускной способности.

Прогноз по методу экстраполяции состоит в том, что в установленную зависимость  $y=f(t)$  или  $y=\varphi(\Pi)$  подставляют интересующие исследователя даты  $t$  или параметры  $\Pi$  и находят соответствующее значение  $y$ , которое принимают за прогнозируемые величины.

Чтобы пользоваться этим методом, необходимо доказать или по крайней мере достаточно полно аргументировать, что установленный закон (тенденция) не изменится в прогнозируемом интервале. Это возможно, когда система весьма инерционна, а изменения идут медленно, без скачков, как это мы наблюдаем, например, при износах деталей или сочленений. Важно при этом не оказаться в зоне, где резко изменяется закон, характер кривой. Поэтому следует выдержать соотношение между базой экстраполяции и дальностью экстраполируемого интервала — в литературе [29] рекомендуется эти отношения принимать от 3:1 до 1:1.

Если устанавливаются технические характеристики машин, то статистические данные (базу экстраполяции) следует брать за последние пять лет, так как машины совершенствуются и данные за большой отрезок времени исказят фактическую картину. Но было бы грубой ошибкой пользоваться только статистическими данными; прежде всего необходимо исходить из сущности прогнозируемого, определяющего стабильность показателей. Так, вполне логично полагать, что с изменением пропускной способности зерноуборочного комбайна изменятся размеры клавишного соломотряса, следовательно, его масса. Но если изменится тип соломотряса, то прежнюю зависимость едва ли можно экстраполировать.

Статистика, как известно, не устанавливает причинных связей и их развитие,

**Схема экстраполирования [29] такова:**

четкое формулирование задачи;

выдвижение гипотез о характере и механизме развития объекта;

выбор параметра, управляющего объектом;

сбор и систематизация информации;

выявление тенденции развития изучаемого явления и

отыскание закона или уравнения кривой;

установление базы экстраполяции;

отыскание прогнозируемых величин.

**Круг задач, решаемых методом экстраполяции, следующий:**

прогнозирование технического состояния сельскохозяйственной техники с учетом того, что 80% отказов приходится на износ, протекающий сравнительно плавно;

прогнозирование массы будущих машин, удельной мощности на единицу грузоподъемности, изменения основных технико-экономических показателей при изменении параметров;

основные тенденции развития технических средств: тракторов, комбайнов, погрузочных и транспортных средств.

К данной главе рекомендуется следующая литература по параграфам: 1 — [32]; 2 — [4, 13, 14, 15, 16, 17, 48, 49, 50]; 3 — [48, 49, 57, 67]; 4 — [5, 26, 40]; 5 — [22, 46, 48, 49]; 6 — [11, 19, 20, 35, 41, 43, 56, 65]; 7 — [11, 39, 52, 68, 71]; 8 — [37, 80]; 9 — [51, 54, 58, 74, 78]; 10 — [45, 53, 59, 60, 62, 75]; 11 — [25]; 12 — [29].

# Глава IV

## Точность измерений

### 1. Общие положения

Измерения — это основа опыта и всего исследования. Д. И. Менделеев писал, что «наука начинается с тех пор, как начинают измерять».

**Измерение** — это операция, при которой находят, во сколько раз измеряемая физическая величина больше (или меньше) соответствующей величины, принятой за единицу. Физические величины: длина (глубина обработки, высота стерни), масса (машины, почвы), сила, скорость и т. д. Соответствующие им единицы: метр (м), килограмм (кг), ньютон (Н) и т. д.

**Точность измерения** — степень соответствия результата измерения действительному значению измеряемой величины.

Результаты научных исследований воплощаются в конструкциях машин, технологических процессах и т. д. Точность результатов измерений влияет на точность расчетов, качество продукции, качество работы машин, их надежность, производительность и многое другое.

Задачи измерения при исследованиях в области точных наук включают в себя отыскание действительного значения (а точнее, оценки этого значения) измеряемой величины и оценки точности измерения. Точность измерения оценивается двумя взаимосвязанными показателями: ошибкой (погрешностью) измерения и его надежностью. *Использовать только один из них нельзя — оценка становится неопределенной.*

**Ошибка измерения** есть разность ( $x_{\text{пр}} - m_x$ ) между результатом измерения  $x_{\text{пр}}$  и действительным значением  $m_x$  измеряемой величины.

**Надежность измерения** есть вероятность того, что действительное значение измеряемой величины отличается от результата измерения не более, чем на значение указанной ошибки.

**Пример IV.1.** Допустим, известно, что действительный объем бункера  $V_0 = 3 \text{ м}^3$ . Используемый метод измерения позволяет определить его с ошибкой  $\Delta V = 0,1 \text{ м}^3$  при надежности  $H = 0,68$ , а результат одного измерения  $V_{01} = 2,95 \text{ м}^3$ . Тогда действительная ошибка  $\Delta V_1 = V_0 - V_{01} = 0,05 \text{ м}^3$  при действительной надежности  $H_1 \approx 1,0$ . В практике измерений действительное значение  $V_0$ , а значит, и  $\Delta V_1$  с  $H_1$ , неизвестны, и поэтому вместо них будут использоваться их оценки, соответственно,  $2,95 \text{ м}^3$ ;  $0,1 \text{ м}^3$  и  $0,68$ . Если взять 100 результатов измерений объема этого бункера таким методом  $V_{0i}$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 100$ ) и найти разности  $|V_{0i} - V_0|$ , то около 68 из них будут не больше  $0,1 \text{ м}^3$  или около 68 интервалов  $V_{0i} \pm 0,1 \text{ м}^3$  будут включать в себя истинное значение  $V_0 = 3 \text{ м}^3$ , а у остальных оно окажется за их пределами. Если посмотреть далее, сколько разностей  $|V_{0i} - V_0|$  не превышают, положим,  $0,3 \text{ м}^3$ , то их окажется заметно больше 68 — большему значению ошибки соответствует большая надежность (рис. 6).

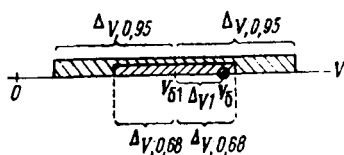


Рис. 6. Оценка значения измеряемой величины и ошибки измерения.

Правильное решение вопросов методики исследования невозможно без анализа точности измерений. Если обеспечить достаточную точность по разным причинам не удастся, следует подумать о целесообразности проведения эксперимента. Он может оказаться тратой времени и средств, или что еще хуже, источником технических просчетов, ведущих к опасным отказам и дорогостоящим неполадкам при использовании или внедрении его результатов на практике. Не следует стремиться и к точности выше необходимой: это удорожает и усложняет исследование, что иногда ведет к его срыву.

В заключение остается сказать, что все положения данной главы базируются на современных рекомендациях и литературных данных. Однако по ряду причин в методиках разных ГОСТов и отраслевых нормалей используются и несколько устаревшие положения, но они позволяют сравнить результаты испытаний и исследований разных исследователей в разные годы. Поэтому старые и новые оценки точности опытов могут использоваться и указываться параллельно.

## 2. Виды измерений

Классификация измерений по некоторым признакам представлена на рисунке 7 [33].

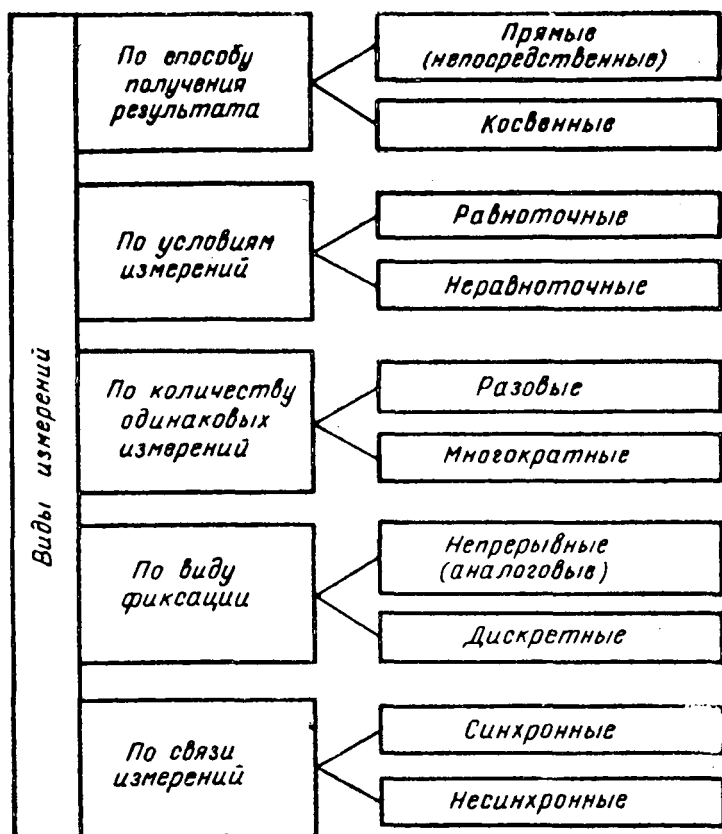


Рис. 7. Классификация измерений.

Прямые измерения дают непосредственное значение измеряемой величины, которое может быть отсчитано по прибору.

Косвенные измерения позволяют вычислить значение измеряемой величины с использованием результатов измерений других (одной или нескольких) величин, с которыми она связана функционально. Мощность двигателя, например, рассчитывают перемножением результатов измерений момента на валу двигателя и скорости его вращения. От способа получения результатов зависит его точность. В большинстве случаев более точны прямые измерения и косвенные измерения с наимень-



шим количеством прямых измерений. Глубину пахоты можно измерить прямо линейкой по открытой борозде. Можно и косвенно, замерив линейкой толщину взрыхленного слоя и поделив результат на «коэффициент вспушенности», который равен 1,2...1,4. При одинаковой точности измерения линейкой во втором случае точность измерения глубины будет ниже, так как на результат наложится ошибка определения «коэффициента вспушенности».

**Равноточные измерения** проводятся в одинаковых условиях, определяющих общую точность измерения (тип, класс точности, экземпляр прибора, число измерений, внешние условия, квалификация оператора). Отдать предпочтение одному или нескольким измерениям в ряду равноточных нельзя.

**Неравноточные измерения** не отвечают указанным выше требованиям. Исследователь по возможности стремится выполнить равноточные измерения одной и той же величины — это значительно упрощает обработку и анализ результатов.

**Однократные измерения** (разовые) используют при измерениях постоянных или практически постоянных величин (массы трактора, площади поля и т. п.).

**Многократные измерения** применяют для замера изменяющихся величин (глубины обработки, скорости движения, времени наполнения бункера и т. п.), так как по результатам разового измерения оценить с достаточной точностью эти величины невозможно. При этом фиксация некоторых из них, представляющих собой непрерывные процессы, например, глубины обработки, может быть *непрерывной (аналоговой)*, в виде линии на ленте осциллографа (рис. 8), или *дискретной*, т. е. в отдельных точках, через определенный интервал времени или пути. При исследовании процессов, их динамики и характеристик, без непрерывной фиксации результатов измерений или без фиксации с малым интервалом нельзя получить полную картину процесса.

Необходимость исследования взаимосвязей явлений и процессов требует *синхронной* фиксации нескольких процессов, т. е. непрерывной или дискретной фиксации, значений нескольких величин в одни и те же моменты времени. При исследованиях и испытаниях плугов, например, синхронно фиксируют глубину пахоты и сопротивление плуга (рис. 8).

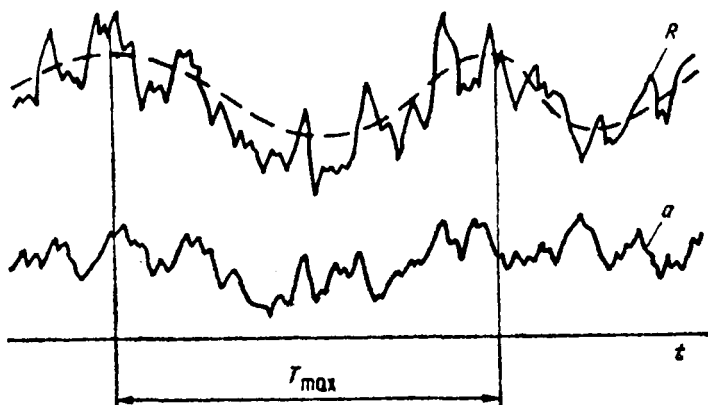


Рис. 8. Реализация случайных процессов:

$R$  — сопротивление плуга;  $a$  — глубина пахоты;  $T_{\max}$  — наибольший период изменения процесса.

### 3. Виды ошибок

По форме числового выражения ошибки разделяют на абсолютные, относительные и приведенные.

*Абсолютная ошибка* имеет размерность измеряемой величины:

$$\Delta_x = x_{\text{пр}} - m_x \approx x_{\text{пр}} - x_{\text{обр}}, \quad (\text{IV.1})$$

где  $m_x$  — действительное значение измеряемой величины;  $x_{\text{обр}}$  — результат ее измерения образцовым прибором или более точным методом;  $x_{\text{пр}}$  — результат ее измерения рабочим прибором или по рабочей методике.

Формула (IV.1) показывает, что действительное значение измеряемой величины неизвестно и заменяется на результат измерения образцовым прибором. Кроме того, и этот результат бывает известен редко (при калибровке), поэтому в исследовании используется  $x_{\text{пр}}$ , а абсолютная ошибка определяется методами, разработанными в теории ошибок. Например, при разовом измерении величины  $x$  прибором значение  $\Delta_x$  находят по его известному классу точности (см. стр. 120).

*Относительная ошибка* обычно выражается в процентах от значения измеряемой величины:

$$\delta_x = 100\Delta_x/m_x \approx 100\Delta_x/x_{\text{обр}} \approx 100\Delta_x/x_{\text{пр}}. \quad (\text{IV.2})$$

*Приведенная ошибка* выражается в процентах от максимального значения измеряемой величины, а для прибора — от диапазона измерения прибора:

$$\delta_{\text{прив}} = 100\Delta x / x_{\text{max}};$$
$$\delta_{\text{пр.прив}} = 100\Delta x / (x_{\text{шк. max}} - x_{\text{шк. min}}). \quad (\text{IV.3})$$

В практических приложениях относительная ошибка, отражающая в себе значение ошибки и значение измеряемой величины и поэтому более информативная, используется чаще всего при характеристике метода измерения, абсолютная — при указании результата измерения, приведенная — является характеристикой прибора.

**Пример IV.2.** Определяем мощность двигателя с помощью тормозной установки. Метод обеспечивает измерение мощности с ошибкой не более 3% при  $H=0,997$ . Приведенные ошибки измерителя момента и тахометра 1,5%. Результат измерения:  $70 \pm 1,5$  кВт.

**По закономерности появления** (или по природе) ошибки разделяются на систематические, случайные и промахи. Природа ошибки определяет методы ее учета, предупреждения, выявления и уменьшения.

*Систематические ошибки* вызываются факторами, действующими одинаковым образом при многократных повторениях одних и тех же измерений. Эти ошибки постоянны или изменяются по известному закону, в большинстве случаев их действительные значения и знак могут быть определены, и они как поправки могут быть учтены в результате измерения.

*Случайная ошибка* вызывается факторами, действие которых неопределенно при многократных измерениях физической величины, и проявляется в том, что результаты этих измерений отличаются один от другого. Оценить значения случайной ошибки можно статистическими методами, но использовать эту оценку в качестве поправки нельзя.

*Промах (грубая ошибка)*, чаще всего однократный, искажает явление, его нужно исключить, но с достаточным обоснованием.

**По надежности измерения** выделяют следующие три «именные» ошибки.

*Среднеквадратическая (стандартная) ошибка* и *вероятная ошибка* ( $\sigma_x$ ,  $\rho_x$ ) — надежность измерений с та-

кими ошибками общеизвестна и равна соответственно 0,68 и 0,5.

*Предельная ошибка  $\Delta_{x \text{ lim}}$*  в исследованиях по механизации сельскохозяйственного производства в большинстве случаев соответствует надежности 0,997. Она может быть систематической, случайной или суммой этих ошибок. Принимают, что вероятность того, что действительное значение измеряемой величины лежит за пределами  $x_{\text{пр}} \pm \Delta_{x \text{ lim}}$ , практически равна нулю.

#### 4. Случайная ошибка, ее источники и характеристики

При случайной ошибке результаты измерений (и ошибки) представляют собой случайные величины.

Источников случайных ошибок, причем одновременно действующих, много. Исследователь обязан в каждом случае измерений разобраться в этих источниках, оценить их и принять меры к предупреждению или учету их влияния.

**Основные источники** следующие: прибор или измерительная цепь (из-за имеющихся зазоров, заеданий и износов в механизмах); свойства объекта (неустойчивость хода плуга по глубине) или изменчивость измеряемой величины (сопротивление плуга); внешняя среда, параметры которой изменяются и оказывают влияние на измеряемую величину (неровности микрорельефа, изменчивость обрабатываемого материала); методика измерения, определяющая выбор приборов, преобразование информации (дискретные измерения непрерывной величины, округление результата, соблюдение инструкций по использованию приборов и оборудования); оператор (человек), который может смотреть на шкалу прибора сбоку, быстро или медленно реагировать на сигналы, по которым включается или выключается прибор.

**Пример IV.3.** Проводится калибровка измерителя крутящего момента путем измерения известного момента  $m_x = x_{\text{обр}} = 900 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Его систематическая ошибка равна, положим, нулю. После выполнения  $n$  измерений ( $n=100$ ) получены значения момента или реализации случайной величины  $X$ , обозначенные  $x_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ): 903, 893, 909, 899, 901, 904, 891, 907, 897, ..., 905. Значения округлены до единицы — случайная предельная ошибка округления  $\pm 0,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Ошибки отдельных измерений  $\Delta x_i = x_i - m_x$ : +3; -7; +9; -1; +1; +4; -9; +7; -3; ..., +5 (рис. 9).

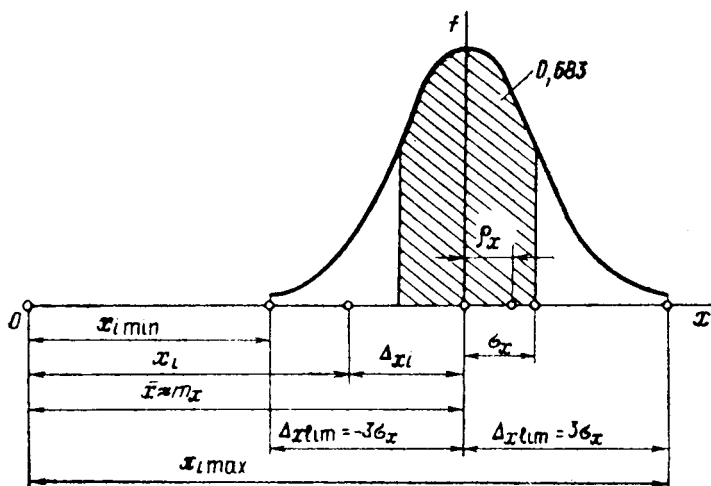


Рис. 9. Кривая нормального распределения с результатами измерений и ошибками;  $H = \Phi(t) = 0,683$  при  $t = \Delta x / \sigma_x = 1$ .

В исследованиях по механизации главной причиной случайной ошибки и разброса результатов многократных измерений чаще оказывается *изменчивость измеряемой величины*. Глубина пахоты при определении средней глубины обработки измеряется в  $n$  точках и значения  $x_i$  и  $\Delta x_i$  представляют собой случайные величины.

**Полная характеристика** случайной величины представляется законом ее распределения.

Обычно принимают, как само собой разумеющееся, что случайная ошибка подчинена *нормальному закону распределения* (рис. 9). Особое значение этого закона связано с тем, что в случаях, когда суммарная ошибка появляется в результате совместного действия ряда причин, каждая из которых вносит малую и одного порядка долю в общую ошибку, результат их суммарного действия приводит к нормальному закону, по какому бы закону не были распределены составляющие ошибки, вызываемые каждой из причин. Важно, чтобы отсутствовал доминирующий фактор. Если он есть, то может быть выявлен, а его влияние будет определять уже систематическую ошибку.

Существует ряд теоретических доводов (но не очень строгих) и многочисленные экспериментальные доказа-

тельства нормальности распределения ошибки. Ряд авторов, например [78], утверждают (и с ними трудно не согласиться), что в настоящее время *допускаются неизмеримо большие ошибки из-за отказа от вероятностной оценки точности измерений, чем от принятия нормальности распределения всех случайных ошибок.*

Нормальный закон распределения (рис. 9) определяется двумя числовыми характеристиками: математическим ожиданием (средним значением) случайной величины  $m_x$  (центром на числовой оси, около которого группируются реализации случайной величины  $x_i$ ) и среднеквадратическим отклонением или стандартом  $\sigma_x$  (оценивающим разброс, рассеяние отдельных реализаций около  $m_x$ ). Нетрудно заметить, что для данных выше примеров  $m_x$  есть истинное (при калибровке прибора) или истинное среднее (при измерении глубины обработки) значение измеряемой величины, а  $\sigma_x$  является показателем точности единичного измерения.

Простейшие расчетные формулы:

$$m_x \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \sigma_x^2 \approx \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta^2 x_i. \quad (\text{IV.4})$$

При нормальном распределении ошибки измерения вероятность (надежность  $H$ ) получения при однократном измерении результата в интервале  $m_x \pm \Delta_x = m_x \pm t\sigma_x$  (где  $t = \Delta_x/\sigma_x$ ) получится как

$$H = \Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (\text{IV.5})$$

Почти во всех пособиях по теории вероятностей и статистике (например, 19, 24, 42 и др.) приводятся табличные значения этого интеграла как  $H = \Phi(t)$ . Большинство исследователей помнят, что  $\Phi(1) = 0,68$ ;  $\Phi(2) = 0,95$ ;  $\Phi(3) = 0,997$ .

**Пример IV.4.** При калибровке в примере IV.3 получено  $\sigma_x = 4,0$  Н·м. Определить надежность однократного измерения с ошибкой  $\Delta_x = \pm 6$  Н·м. При  $t = 6/4 = 1,5$  значение  $\Phi(t) = 0,87$  и  $\Delta_{x;0,87} = \pm 6$  Н·м.

Часто приходится решать обратную задачу — оценить ошибку при заданной надежности  $H$ . В этом случае используют таблицы функции, обратной  $\Phi(t)$  (IV.5). В ней указываются границы интервала  $\pm u_p = t$ ,

в который значение реализации случайной величины попадает с вероятностью  $P = \Phi(t) = H$ . Искомый интервал

$$\pm \Delta_{x,H} = \pm u_P \sigma_x. \quad (\text{IV.6})$$

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} \Delta_{x;0,68} &= \sigma_x; \quad \Delta_{x\text{lim}} = \Delta_{x;0,997} = 3\sigma_x; \\ \Delta_{x;0,5} &= \rho_x = \frac{2}{3} \sigma_x. \end{aligned} \quad (\text{IV.7})$$

**Пример IV.5.** Найдём случайную ошибку однократного измерения момента при  $H=0,90$ . По таблице при  $\Phi(t)=H=0,9$  находим  $u_P=t=1,64$ .  $\Delta_{x;0,90} = \pm 1,64 \cdot 4 = \pm 6,6$  Н·м.

Если случайная величина распределена нормально, то средние арифметические  $\bar{x}$ , полученные в нескольких сериях ( $m$ ) по  $n$  равнооточных измерений в каждой, тоже распределены по нормальному закону с тем же  $m_x$ , но стандарт этого распределения

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma_x / \sqrt{n}. \quad (\text{IV.8})$$

**Пример IV.6.** При единичном измерении крутящего момента установкой с  $\sigma_x=4$  Н·м получен результат 940 Н·м. Можно говорить, что с надёжностью 0,95 действительное значение момента находится в интервале  $940 \pm 2\sigma_{\bar{x}}$  или 932...948 Н·м. Если же результат 940 Н·м, получен как среднее по 25 измерениям, то с той же надёжностью 0,95 действительное значение момента находится в пределах  $940 \pm 2\sigma_{\bar{x}}$  или 938,4...941,6 Н·м. Это и является объяснением повышения точности при многократных измерениях.

Все, что говорилось выше про ошибки единичного измерения  $\Delta_{x,H}$  можно повторить, говоря про ошибки средней  $\Delta_{\bar{x},H}$ ; при  $n=1$  они и по смыслу, и по величине неразличимы, поэтому формулы (IV.6 и IV.7) и подход к определению интервалов и надёжности верны при замене в них  $x$ ,  $\sigma_x$  и  $\rho_x$  на  $\bar{x}$ ,  $\sigma_{\bar{x}}$  и  $\rho_{\bar{x}}$ . Например,

$$\pm \Delta_{\bar{x},H} = \pm u_P \sigma_{\bar{x}} / \sqrt{n} = \pm u_P \sigma_{\bar{x}}. \quad (\text{IV.9})$$

Отметим, что ошибка  $\sigma_x$  ( $\rho_x$  и т. п.) указывается при характеристике метода измерения или измерительной цепи и по ней можно определить число измерений  $n$ , обеспечивающее требуемую точность измерений, а ошибка  $\sigma_{\bar{x}}$  указывается при результате измерения.

Расчёты по точности измерений, базирующиеся на формулах (IV.5; IV.6; IV.9), верны лишь в тех случаях, когда известно или  $m_x$  (при калибровке прибора, как в примере с моментом) или  $\sigma_x$  (например, при измере-

нии этим прибором). Очень часто, однако, неизвестно ни то, ни другое (при измерении глубины пахоты), и это необходимо учитывать.

Количество измерений  $n$  всегда ограничено, и поэтому найти истинные значения  $m_x$  и  $\sigma_x$ , соответствующие  $n = \infty$ , не представляется возможным. В этом случае вместо них используют их статистические аналоги (оценки) — статистическое среднее, среднее арифметическое полученных значений  $\bar{X} \approx m_x$  и эмпирический стандарт  $s_x \approx \sigma_x$ , вычисляемые по формулам (IV.4).

Вместо (IV.9) используется выражение

$$\Delta_{\bar{x},H} = t_{H,k} s_x / \sqrt{n} = t_{H,k} s_{\bar{x}}, \quad (\text{IV.10})$$

где  $t_{H,k}$  — квантиль распределения Стьюдента, аналогичный  $u_p$  и зависящий от параметра  $k$ , называемого числом степеней свободы и равного для данной задачи  $n-1$ .

Значения  $t_{H,k} = f(k)$  затабулированы при разных значениях  $H$ . Например, при  $H=0,95$  и  $k=4$  значение  $t_{0,95;4} = 2,78$ , а соответствующее значение  $u_{0,95} = 1,96$ . С увеличением  $n$  различие уменьшается. Уже при  $n=31$   $t_{0,95;30} = 2,04$ , при  $n=\infty$ , а практически при  $n \geq 200$  они совпадают. При исследованиях в области механизации сельскохозяйственного производства определение ошибки с ошибкой 5...10% во многих случаях вполне приемлемо. Это позволяет решить вопрос об использовании формул (IV.9 и IV.10).

Необходимо отметить, что рассмотренные приемы позволяют найти лишь среднее значение ошибки при среднем значении надежности. Определение ошибки ошибок и более точные расчеты из теории ошибок изложены в литературе: доступно с доказательствами и примерами в [19], расчетные формулы с примерами и таблицами [21, 64 и др.]. Методы отыскания вида закона распределения приведены в [19, 33, 64].

Все рассмотренное выше относилось к обработке результатов равноточных измерений. При наличии случайной ошибки равноточность двух рядов результатов измерений определяется равенством их стандартов  $\sigma_{xi}$ , равноточность измерения двух средних — равенством  $\sigma_{\bar{x}t}$ .

В практике встречаются случаи, когда приходится искать оценки величины и точности по ряду неравноточных измерений. При необходимости можно воспользоваться рекомендациями [2, 34, 64]. Наиболее точное,



но громоздкое решение представлено В. И. Романовским, остальные — упрощенные, но достаточно надежные для наших исследований.

## 5. Пути уменьшения и суммирование случайных ошибок

Основной путь уменьшения случайной ошибки от отдельного источника — увеличение количества повторных измерений, если источником ошибки является прибор с известной исследователю природой ошибки (в примере с моментом найдено, что ошибка случайная) или если проводятся дискретные измерения непрерывно изменяющейся случайной величины (отыскивают среднюю глубину пахоты).

Необходимое число измерений получается из (IV.9):

$$n = \left( \frac{u_p \sigma_x}{[\Delta_{\bar{x}; H}]} \right)^2 = \left( \frac{\sigma_x}{[\sigma_{\bar{x}}]} \right)^2, \quad (\text{IV.11})$$

где  $[\Delta_{\bar{x}; H}]$ ,  $[\sigma_{\bar{x}}]$  — допустимая ошибка среднего значения величины.

В практике рассматриваемых измерений, особенно при измерениях величин, представляющих собой случайные процессы или последовательности (сопротивление плуга, время оборота транспорта и т. п.), значения  $\sigma_x$  чаще всего заранее неизвестны или точность их невысокая — их берут из литературы, по данным немногочисленных предварительных или поисковых опытов (т. е. вместо  $\sigma_x$  используют  $s_x$ ). В этих случаях ориентировочный расчет  $n$  по (IV.11) дает большую ошибку.

При неизвестном  $\sigma_x$  рекомендуется пользоваться таблицей 3 [18] — количество измерений находят по требуемой надежности  $H$  и отношению  $\Delta = [\Delta_{\bar{x}; H}] / s_x$ . При этом строгих правил выбора надежности нет. В практике исследований по механизации сельскохозяйственного производства [18] при установлении общей тенденции развития явления достаточна  $H = 0,68 \approx 0,7$ . Для измерений, связанных с конструкциями машин, достаточна  $H = 0,9$ . При определении деталей закономерностей и значений величин, являющихся основой для дальнейшего расчета, необходима  $H = 0,99$ .

Если с помощью таблицы 3 легко найти точность выполненных измерений по известным  $n$ ,  $\Delta$ ,  $s_x$ , то при отыскании неизвестного  $n$  возникают трудности, связанные с определением значения  $s_x$  (по какому количеству

Таблица 3. Необходимое количество опытов для измерений (по В. И. Романовскому)

| Ошибка, $\Delta$ | Надежность опыта, $H$ |     |      |      |      |
|------------------|-----------------------|-----|------|------|------|
|                  | 0,5                   | 0,7 | 0,9  | 0,95 | 0,99 |
| 3,0              | 1                     | 1   | 2    | 3    | 4    |
| 2,0              | 1                     | 1   | 3    | 4    | 5    |
| 1,0              | 2                     | 3   | 5    | 7    | 11   |
| 0,5              | 3                     | 6   | 13   | 18   | 31   |
| 0,4              | 4                     | 8   | 19   | 27   | 46   |
| 0,3              | 6                     | 13  | 32   | 46   | 78   |
| 0,2              | 13                    | 29  | 70   | 99   | 171  |
| 0,1              | 47                    | 169 | 273  | 387  | 668  |
| 0,05             | 183                   | 431 | 1084 | 1540 | 2659 |

ву опытов искать его, так как точность измерения какой-либо величины задается не значениями  $\Delta_{x,H}/s_x$ , а значениями  $\Delta_{x,H}$  или  $\delta_{x,H}$ , в таблице же  $s_x$  соответствует указанному в ней же количеству измерений).

В данном случае можно воспользоваться следующими положениями. Если основным источником случайной ошибки является прибор (практически этому соответствует верхняя часть указанной таблицы), то  $s_x$  находят как  $\Delta_{\text{пр}}/3$ , где  $\Delta_{\text{пр}}$  — предельная абсолютная ошибка прибора. Если основной источник ошибки — изменчивость измеряемой величины, то, воспользовавшись данными таблицы, получим, что  $s_x$  необходимо определять для значений  $H=0,99$  по  $n \geq 50$ , для  $H \leq 0,90$  по  $n \geq 30$ , но с учетом (IV.13 и IV.13а). При таком числе измерений стандартная ошибка статистического стандарта [34]

$$\sigma_s \approx s_x / \sqrt{2n} \approx 0,1s_s, \quad (\text{IV.12})$$

т. е. не превышает допускаемой точности определения ошибки измерений [34, 78], а результат расчета по (IV.11) практически совпадает с данными таблицы.

**Пример IV.7.** Измеряем постоянное усилие  $x$  с  $[\Delta_{x,0,99}] = 50$  Н. Ошибка динамометра  $\Delta_{\text{пр}} = 150$  Н. Тогда  $s_x = 150/3 = 50$  Н, значение  $\Delta = 1$ . По таблице при  $H = 0,9$  получаем  $n = 5$ . При расчете по (IV.11) результат заниженный:  $n = (1,65 \cdot 50/50)^2 = 2,7 \approx 3$ .

При неизвестном  $\sigma_x$  значение  $n$  можно найти лишенным вышеуказанных недостатков методом последовательного приближения в следующем порядке. Выполняем приемлемое число измерений  $n_0$ , вычисляем  $s_{x0}$ , и

по (IV.10) находим  $\Delta \bar{x}_{i,H}$ . Если  $[\Delta \bar{x}_{i,H}] < \Delta \bar{x}_{i,H}$ , то подставляя в (IV.11) вместо  $\sigma_x$  значение  $s_{x0}$ , находим приближенное значение  $n = n_1$ , выполняется  $n_1$  измерение и цикл повторяется до получения  $[\Delta \bar{x}_{i,H}] \geq \Delta \bar{x}_{i,H}$  [18, 34]. Но метод не всегда удобен (например, при осциллографировании).

Другой путь уменьшения случайной ошибки — замена прибора (или метода измерения), являющегося источником этой ошибки, на более точный.

Для уменьшения случайной ошибки измерения изменяющейся величины важно не только выполнить достаточное количество измерений, но и выполнить их на «представительном промежутке» (пути, времени и т. п.). Можно записать сопротивление плуга осциллографом на пути 5 м, измерить  $n$  ординат, найти среднее значение и стандарт. Сопротивление на этом коротком пути будет найдено очень точно, но характеризовать плуг и обрабатываемое поле оно будет недостаточно точно. Можно пользоваться следующими рекомендациями, изложенными более строго в предлагаемой литературе [21, 48, 49 и др.].

Определение дисперсии  $\sigma_x^2$  процесса со стандартной ошибкой порядка 2% возможно по длине реализации процесса

$$T \geq 10T_{\max}, \quad (\text{IV.13})$$

где  $T_{\max}$  — наибольший период колебаний величины, встречающийся в записи процесса (рис. 8, с. 104).

В случайных процессах с периодической составляющей, а большинство реальных процессов ее имеют, для определения среднего значения с допускаемой ошибкой  $[\sigma_{\bar{x}}]$  необходима длина реализации

$$T \approx \frac{2\alpha\sigma_x^2}{\left[\frac{\sigma_x^2}{x}\right] (\alpha^2 + \beta^2)}, \quad (\text{IV.13a})$$

где  $\alpha$  и  $\beta = 2\pi/T_{\max}$  — показатель интенсивности затухания корреляционной функции и частота низшей периодической составляющей процесса (см. с. 204).

Необходимо отметить, что следует с большой осторожностью пользоваться данными других исследователей о значениях  $\alpha$  и  $\beta$ , так как их обычно определяют по реализациям, приведенным к стационарному виду, а ме-

тод этого приведения часто зависит от задач исследования.

**Суммирование случайных ошибок.** Исследователя при измерениях интересуют вопросы о том, как найти результирующую случайную ошибку многих источников и что, пожалуй, более для него важно, как, зная допускаемую общую ошибку измерения, определить допускаемую от каждого источника и уменьшить ее (при необходимости). При измерении сопротивления плуга с помощью осциллографа, например, получают по крайней мере три случайные ошибки, вызванные изменчивостью сопротивления, трением и зазорами в измерительном устройстве, округлением результатов измерения ординат.

Возникает вопрос о сложении случайных ошибок. Доказано, что результирующую случайную ошибку  $\sigma_{x\Sigma}$  при любом законе распределения составляющих  $\sigma_i$  находят как

$$\sigma_{x\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{i < j} r_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad (\text{IV.14})$$

где  $r_{ij}$  — коэффициент корреляции между каждой парой составляющих погрешностей (см. главу VI, параграф 4).

Как показывает опыт, случайные ошибки редко бывают коррелированными или корреляцией можно пренебречь. Тогда  $r_{ij} = 0$

$$\sigma_{x\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2. \quad (\text{IV.15})$$

При наличии сильной корреляции ошибок расчет выполняют по (IV.14) с подстановкой  $r_{ij} = 1$ , так как точное его значение обычно трудно определить. Если только часть ошибок коррелирована, то в начале складывают по (IV.14) коррелированные, а затем эту сумму складывают с остальными ошибками по (IV.15).

Если отдельные случайные ошибки распределены по разным законам, то можно провести расчет  $\sigma_{x\Sigma}$ , найдя  $\sigma_i$  с учетом вида распределения [33], или в ответственных случаях, связанных с опасностью для жизни и возможным большим материальным ущербом, изучить ошибки, моделировать объект и прибор, определить ошибки измерений и совершенствовать методику измерений [44]. Как показано [78], в большинстве случаев

при симметричных распределениях ошибок (равновероятном для ошибки округления, треугольном) допустимо принимать вид распределения нормальным.

Часто отклонения от нормального закона распределения результатов измерений и их ошибок появляются вследствие неисправности приборов или ошибок в методике [78]—об этом целесообразно подумать. Иногда он и не может быть нормальным, особенно для ошибок сложных приборов. Например [78], если прибор измеряет массу шарикового подшипника, а выдает значения его диаметра, то при нормально распределенной ошибке измерения массы, ошибки измерения диаметра будут иметь асимметричное распределение (которое, правда, может не противоречить нормальному).

По формулам (IV.14; IV.15) складывают ошибки единичных измерений, а суммарную ошибку среднего значения  $\sigma_{\bar{x}}$  находят по выражению (IV.18) как  $\sigma_{x\Sigma}/\sqrt{n}$ . Если число слагаемых в (IV.15) не менее четырех и они соизмеримы, то закон распределения результирующей нормальный и при расчете  $\Delta_{x\Sigma, H}$  для разных  $H$  справедливы формулы (IV.6 и IV.10).

Из зависимости (IV.15) следует два весьма важных вывода:

за счет второй ошибки  $\sigma_2$ , меньшей в 2 раза первой  $\sigma_1$ , т. е. при  $\sigma_2 = 0,5\sigma_1$ , общая случайная ошибка  $\sigma_{x\Sigma}$  увеличится только на 10%, что обычно играет малую роль, поэтому при сложении двух—четырех случайных ошибок, из которых резко выделяется одна (большая в 3...5 раз), можно указывать только ее (это может быть и обоснованием для того, чтобы пренебречь корреляцией ошибок);

для повышения точности измерения прежде всего нужно уменьшать наибольшую по действительному значению составляющую ошибки.

**Пример IV.8.** Требуется снять ординаты процесса  $R$  (рис. 8, с. 104). По осциллограмме  $R_{\max} - R_{\min} = 30$  мм. Какова получится дополнительная случайная ошибка, если значение высоты ординаты округлять до 1 мм?

Полагая, что распределение ординат  $R_i$  нормальное, можно считать, что  $\sigma_R \approx 5$  мм. Ошибка округления  $\Delta_{\text{окр. нм}} = \pm 0,5$  мм, а при равновероятном распределении  $\sigma_{\text{окр}} \approx 0,5/\sqrt{3} = 0,3$  мм. Тогда  $\sigma_{R\Sigma} = 5^2 + 0,3^2 = 5,01$  мм и отличается от  $\sigma_R$  на 0,2%.

**Пример IV.9.** Измеряем глубину пахоты  $a$  глубиномером. Требуется определить допускаемую ошибку округления результатов измерения  $\Delta_{\text{окр. лим}}$ , увеличивающую общую ошибку измерения

глубины не более чем на 5%, если  $\sigma_a \approx s_a = 1,5$  см. Можно записать:  $\sigma_{a\pm} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = 1,05\sigma_a$ . После преобразований получим  $\sigma_{\text{окр}} = 0,32\sigma_a = 0,48$  см, или  $\Delta_{\text{окр.лн}} = \sigma_{\text{окр}}\sqrt{3} = \pm 48\sqrt{3} = \pm 0,8$  см. Удобнее измерять с предельной ошибкой  $\pm 0,5$  см, т. е. округлять до сантиметров.

Очевидно, что в обоих примерах общая случайная ошибка определяется изменчивостью измеряемых величин. Уменьшать прежде всего необходимо  $\sigma_R$  и  $\sigma_a$ , увеличивая количество измерений (в данных случаях уменьшаются соответственно и составляющие ошибки, определяемые случайными ошибками прибора и округления).

## 6. Промах и его исключение

Если в ряду результатов измерений встретится один, резко отличающийся от других, то мы склонны считать его промахом и отбросить. Причиной промаха могут быть прибор (отказ его), окружающая среда или обрабатываемый материал (случайное попадание наконечника почвенного твердомера между глыбами почвы), оператор (ошибочная запись). Иногда можно найти причину промаха. Наиболее эффективные способы: сменить шкалу при отсчете («отломить» начало у линейки и мерить ею); повторить замер другому наблюдателю, заменить прибор и повторить измерение. Однако это не всегда возможно по разным причинам.

В основе всех методов обоснования отбрасывания промаха ( $x_{i \text{ пром}}$ ) лежит определение вероятности  $P'$  появления такого результата измерения, и при малом уровне этой вероятности ( $P' = 0,01$  или  $P' = 0,003$ ) его отбрасывают. При известном  $\sigma_x$  разность  $|\bar{x} - x_{i \text{ пром}}|$  может превысить значение  $3\sigma_x$  с вероятностью 0,003, или 0,3%, и если это превышение наблюдается, то с надежностью вывода  $P = 1 - P' = 0,997$  значение  $x_{i \text{ пром}}$  содержит грубую ошибку. Его можно исключить из ряда результатов измерений.

Метод исключения промаха при неизвестном  $\sigma_x$  рассмотрен в главе VI, параграф 4. Другие обоснования можно найти в литературе [18, 33, 34, 64]. В частности, в источнике [34] отмечается, что принятие случайного отклонения за промах и «неправильное» его исключение обычно не приводит к заметному изменению оценки, но важно не выбрасывать результат по интуиции, без ис-

пользования определенных критериев. Исключение из ряда более двух промахов не рекомендуется, если не найдена их причина.

## 7. Средства измерений и их характеристики, определяющие точность измерений

Для выполнения измерений служат измерительные приборы, а с развитием и совершенствованием методов и средств измерений — измерительно-информационные системы (ИИС) [47].

**Измерительно-информационная система** — комплекс устройств для получения, преобразования и выдачи измерительной информации (рис. 10). Измерительный прибор, очевидно, служит простейшей ИИС. Большинство ИИС при исследованиях и испытаниях работают по принципу электрических измерений неэлектрических величин, когда измеряемые величины различной физической природы преобразуются в одинаковые по природе электрические сигналы. Это позволяет использовать дистанционное управление, синхронизировать измерения различных величин в разных точках установки, просто преобразовывать сигналы (умножать, делить, складывать и т. д.), механизировать и автоматизировать обработку результатов измерений.

Рассмотрим измерительно-информационную систему и ее возможности на примере измерения вертикальных и горизонтальных сил, действующих на трактор со стороны полуприцепа.

Вместо прицепной скобы трактора устанавливают специальную балку (рис. 11, б). Балка деформируется под действием сил и является чувствительным элементом 1 (рис. 10). Деформация балки вызывает удлинение или укорочение наклеенных на нее первичных преобразователей — проволоочных датчиков 2 (рис. 10 и 11, а), что ведет к изменению их сопротивления и тока в цепи. Датчик —

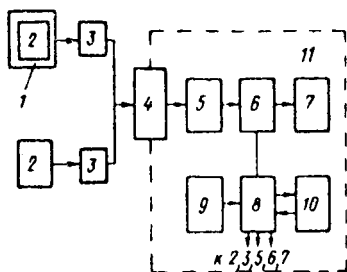


Рис. 10. Схема информационно-измерительной системы (ИИС):  
1—10 — обозначения в тексте; 11 — измерительная лаборатория.

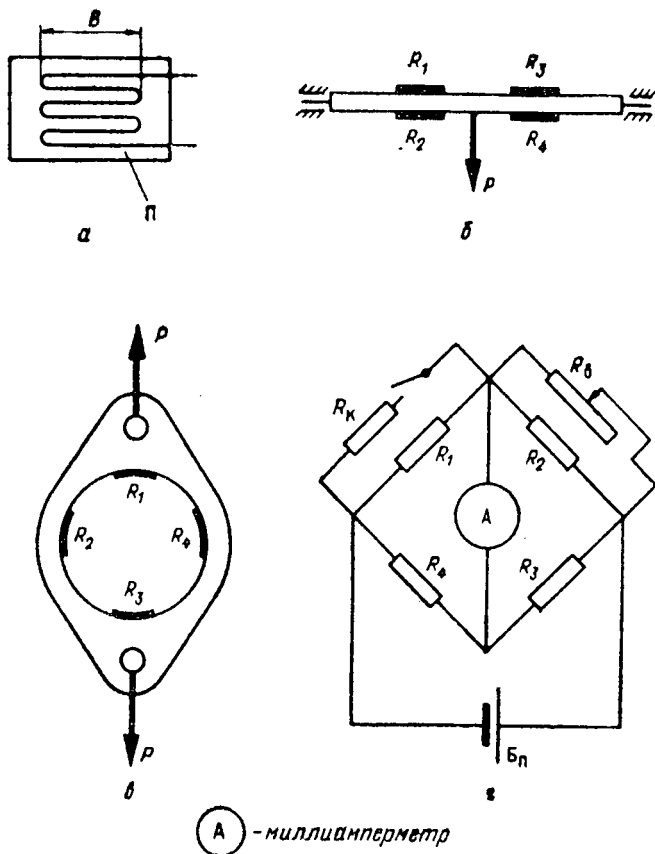


Рис. 11. Элементы измерительных звеньев:

$a$  — проводочный датчик с базой  $B$  (5...30 мм) на подложке  $\pi$ ;  $б$  — измерительная балка с наклеенными датчиками;  $R_i$  — сопротивление  $i$ -го датчика;  $P$  — измеряемая сила;  $в$  — силовое измерительное звено;  $г$  — простейший измерительный мост:  $B_n$  — блок питания; при  $R_1 R_3 = R_2 R_4$  в диагонали с миллиамперметром тока нет;  $R_6$  — переменное сопротивление балансировки моста (установки нуля в диагонали с миллиамперметром при  $P=0$ ), необходимое вследствие неточности изготовления сопротивлений и наличия проводов;  $R_K$  — калибровочное сопротивление (блока контроля).

конструктивно законченный прибор для преобразования воздействия измеряемой величины в электрический или другой сигнал. Сигнал датчика поступает в нормализующее устройство  $З$  (рис. 10). Чаще всего это измерительный мост (рис. 11,  $г$ ), позволяющий разгрузить измери-



тельную цепь от больших электрических нагрузок, и компенсирующие устройства (цепи). В нашем примере необходимо «очистить» сигнал вертикальной нагрузки от горизонтальной, и наоборот. Приходится компенсировать температурные и другие изменения. Компенсация устраняет некоторые систематические ошибки. В настоящее время выпускают измерительные звенья, в которых конструктивно объединены чувствительный элемент и датчики, соединенные по мостовой схеме (рис. 11, в).

По линии связи 4 (рис. 10) (токосяемники, кабель и т. п.) нормализованный сигнал поступает в измеритель 5, чаще всего выполняющий изменение масштаба сигнала, а затем к функциональному преобразователю 6. Здесь происходят усиление (при необходимости) сигнала, его кодирование (положим, для ЭВМ) и функциональные преобразования: вычисление среднего значения, перемножение разных сигналов, интегрирование кривой и т. п. в зависимости от вида преобразователя. Преобразователи представляют собой включенные в ИИС вычислительные машины разной сложности. Измеритель 5 может располагаться и после преобразователя 6. Оба они могут отсутствовать, например, при обработке осциллограммы вручную с умножением результатов на масштаб.

Окончательный результат поступает на устройство 7 хранения и выдачи информации. Индикаторные устройства типа 7 требуют снятия отсчета оператором и могут быть стрелочными (со шкалой) и цифровыми, как, например, счетчик мото-часов трактора. В регистрирующих устройствах показатели записываются на бумажный (осциллограф, цифropечатающие и перфорирующие приборы), магнитный (магнитограф) или другой носитель, что обеспечивает документальность и объективность результатов измерений.

Управляют ИИС с пульта 8. Блок питания 9 обеспечивает напряжение и частоту тока, необходимые для работы системы. Измерительно-информационная система может включать и дополнительные устройства 10, например блок калибровки и контроля.

Для измерений при исследованиях и испытаниях в области механизации сельского хозяйства широко используют мобильные измерительные лаборатории, типа специальной тензоизмерительной лаборатории СТИЛ-1

конструкции ВИСХОМ\* или передвижной тензометрической лаборатории ПТЛ, разработанной ЦМИС\*\*, объединяющих в себе элементы 5...10 (см. рис. 10).

Необходимо отметить, что при работе с ИИС и приборами, особенно с электрическими и электронными преобразователями, важно не допустить искажений или необоснованных изменений принятых или проверенных структур ИИС и ее элементов, чтобы не вызвать больших дополнительных ошибок и трудно выявляемых промахов.

Описание датчиков, их расчет и схемы соединения, описание и характеристики приборов и установок для испытаний и исследований машин, их механизмов, узлов и деталей достаточно полно представлены в литературе [22, 23, 38, 47, 81], а также в периодических изданиях, связанных с механизацией сельскохозяйственного производства.

Точность измерений зависит от метрологических и динамических характеристик ИИС, ее элементов и приборов.

**Метрологические характеристики прибора** — гостимруемые показатели точности, которые должны учитываться при его выборе и при составлении измерительной цепи. Они определяют ошибки статических измерений постоянных (нединамичных) величин при медленном «нагружении».

*Класс точности* показывает предельную приведенную статическую ошибку прибора в процентах от максимального значения или диапазона шкалы при нормальных условиях ( $t=20^{\circ}\text{C}$ ,  $p_a=760$  мм рт. ст., медленное нагружение и т. п.). Ошибки при других условиях оговариваются в документации на прибор. Например, тяговый динамометр с пределами измерений 10...50 кН класса точности 1 имеет предельную ошибку 0,4 кН. Измерения усилия 10 кН получаются с ошибкой  $\delta_{\text{lim}}=4\%$ .

Предельные ошибки измерений ряда приборов даны в таблице 4 [18].

*Вариация показаний* — наибольшая разность между показанием прибора при многократных повторных статических измерениях и показанием образцового при-

---

\* Всесоюзный институт сельскохозяйственного машиностроения.

\*\* Центральная машиноиспытательная станция.

Таблица 4. Предельные ошибки при различных способах измерений

| Способ измерения, инструмент, прибор  | Предельная ошибка (в %) |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Стальная 20-метровая лента            | 0,20...0,30             |
| Планиметры линейные и полярные        | 0,40...0,70             |
| Угломеры оптические                   | 0,5...2,00              |
| Светодальномеры                       | 0,01...0,02             |
| Тахометры центробежные                | 0,40...2,50             |
| Тахогенераторы                        | 2,50...4,00             |
| Тахоскопы                             | 0,80...1,10             |
| Стробоскопы                           | 0,10...1,00             |
| Весы:                                 |                         |
| торговые и автомобильные              | 0,80...1,20             |
| технические                           | 0,10...0,20             |
| аналитические                         | 0,0001...0,01           |
| Динамометры тяговые:                  |                         |
| пружинные                             | 1,00...3,50             |
| гидравлические                        | 0,70...2,00             |
| электрические (датчики без усилителя) | 0,20...0,50             |
| Тормоза:                              |                         |
| балансирные                           | 0,40...1,00             |
| гидравлические                        | 1,50...2,50             |
| пневматические                        | 1,50...4,00             |
| Ртутные манометры                     | 1,00...2,50             |
| Фотоэлектрические датчики             | 0,40...2,00             |
| Стандартные секундомеры               | 0,40...0,70             |
| Термопары (без усилителя)             | 0,50...2,50             |
| Фотометры                             | 0,05...2,00             |
| Спектрометры                          | 0,10...5,00             |
| Газоанализаторы с поглощением         | 0,50...5,00             |
| Хроматографические газоанализаторы    | 0,10...2,00             |
| Дифференциальные калориметры          | 0,01...1,00             |
| Стандартные вискозиметры              | 1,00...4,00             |
| Ртутные технические термометры        | 0,30...2,00             |
| Полупроводниковые термометры          | 0,10...1,00             |
| Твердомеры ударного действия          | 7,00...15,00            |
| Запись осциллографом при усилении     | 1,50...4,50             |

бора. Она характеризует степень устойчивости показаний и зависит от трения, зазоров и т. д. в механизмах приборов. Это предельная случайная ошибка прибора, учтенная классом точности. В примере с моментом (см. с. 106) она равна  $9 \text{ Н} \cdot \text{м} = \Delta_{x,i \text{ max}}$ .

*Чувствительность прибора* — отношение приращения показания прибора  $d\Pi$  к приращению измеряемой величины  $dx$ . У приборов со шкалой она равна цене деле-

ния. Чувствительность прибора определяет ошибку при считывании показаний прибора.

Чувствительность ИИС равна произведению чувствительностей ее элементов.

Пределы измерения прибора — рабочий диапазон шкалы прибора должен соответствовать ожидаемым значениям измеряемой величины. Следует учитывать и перегрузочную способность прибора.

Собственное потребление энергии прибором, которая отбирается от объекта, может грубо нарушить режим работы объекта. Например, определение температуры в малом объеме воды термометром большой массы исказит измерение, так как температуры их должны выравниваться.

Динамические характеристики определяют ошибки измерений величин, изменяющихся в процессе непрерывного их измерения. Большинство фиксируемых процессов при исследованиях сельскохозяйственной техники являются колебательными. Инерционность элементов ИИС (индуктивностей, емкостей, масс и т. д.) ведет к отставанию результата измерения по фазе от фактического процесса. Резонансные явления в системе (резонанс токов, напряжений, механический резонанс) приводят к искажению амплитуды (рис. 12).

Динамические свойства ИИС и прибора отражают их частотные характеристики (амплитудная и фазовая), позволяющие определить ошибки по амплитуде и по

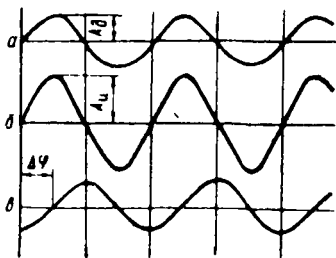


Рис. 12. Динамические ошибки:

$a$  — действительный процесс с амплитудой  $A_d$ ;  $b$  — запись с ошибкой по амплитуде:  $A_{и}$  — измеренная амплитуда;  $в$  — запись с ошибкой по фазе;  $\Delta\varphi$  — сдвиг (отставание) по фазе.

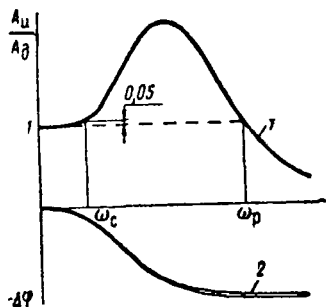


Рис. 13. Частотные характеристики измерительно-информационной системы (ИИС):

1 — амплитудная; 2 — фазовая.

фазе при измерении колебаний разных частот (рис. 13). Экспериментально их определяют подачей на вход ИИС синусоидальных сигналов с изменением частоты сигнала в каждом опыте через интервал  $\Delta\omega$  в пределах от 0 до  $\omega_c$  или  $\omega_p$ . Частотные характеристики могут быть рассчитаны по известной передаточной функции ИИС [47 и др.]. Прибором с характеристиками, представленными на рисунке 13, можно измерять одночастотные процессы с частотами до  $\omega_p$  и даже выше, внося затем поправки в результаты измерения, и те случайные процессы, в которых высшая частота спектра не превышает  $(0,1...0,2)\omega_c$ .

В технических характеристиках серийных приборов указываются рабочие диапазоны измеряемых частот. Для конструируемых самостоятельно они должны быть определены опытным, расчетным путем или по аналогии с существующими приборами (очень осторожно!).

## 8. Калибровка и ошибка прибора

Стандартизованные и гостированные приборы проходят обязательную регулярную проверку (контрольную калибровку) в местных отделениях Госстандарта СССР. Эти приборы должны иметь паспорта или свидетельства о проверке. При проверке определяют соответствие точности измерений прибором его классу точности. При необходимости прибор регулируют, рекомендуют к ремонту или списанию.

Нестандартные приборы и ИИС исследователь обязательно калибрует до и после опытов.

**Калибровка** — это определение масштаба измерения (обычно с построением калибровочной кривой) и ошибки прибора или ИИС.

**Масштаб** — количество единиц измеряемой величины, приходящееся на одно деление (единицу длины) шкалы или на единицу измерения устройства выдачи информации. Ориентировочное значение масштаба определяют перед калибровкой с учетом значений измеряемой величины. Масштаб должен быть таким, чтобы при измерении ординат ошибка округления результата была на порядок (можно в 5...10 раз) меньше ошибки калибровки (при измерении постоянной величины) или случайной ошибки единичного измерения, вызванной изменчивостью измеряемой величины (см. пример IV.8).

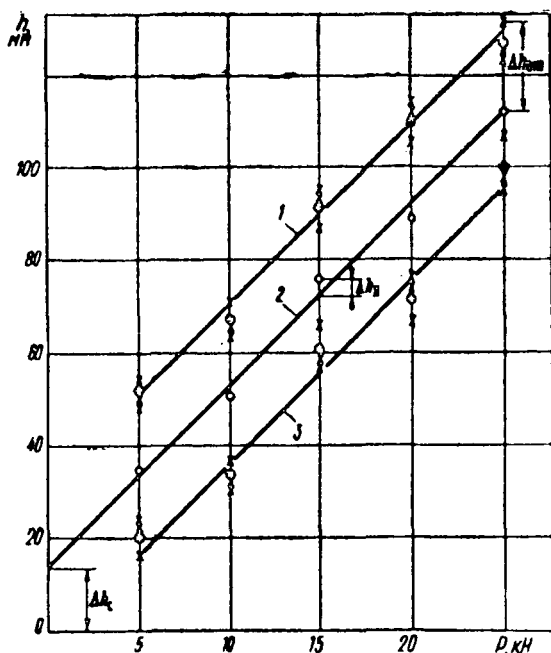


Рис. 14. Результаты калибровки ИИС (утрировано):

× — результаты отдельных измерений; ● — средние по ступеням для одного режима нагружения; ○ — средние по ступеням. Ошибки:  $\Delta h_c$  — систематическая,  $\Delta h_{ст}$  — статическая (вариация),  $\Delta h_l$  — линейности.

**Калибровочная кривая** — график зависимости показаний калибруемого прибора от показаний более точного, использованного при калибровке. Наиболее точные — эталонные приборы (первичные, вторичные и т. д.), образцовые I...IV разрядов; есть контрольные и рабочие разных классов точности. У динамометров, например, приведенные ошибки соответственно равны (в %): 0,025; 0,1...0,5; 0,5; 1...2.

Рассмотрим калибровочную кривую ИИС с осциллографом для определения горизонтальной составляющей силы, действующей на трактор со стороны полуприцепа в движении. Кривая в данном случае (рис. 14) представляет собой линию, построенную в координатах: сила  $P$  (кН) — высота ординаты  $h$  (мм). Допустим, что усилие на измерительное звено (балку, рис. 11, б) пе-

редается через образцовый динамометр в точку приложения силы  $P$  с помощью домкрата. При ее значениях  $P_i$  (0, 5, 10, 15, 20, 25 кН) включается осциллограф и фиксируется высота ординаты, соответствующая каждой ступени. Ступеней калибровки должно быть не менее пяти (не включая нуль). Вначале балка плавно нагружается до значений  $P_i$  (подход снизу), затем после установки и фиксации  $P_{\max}$  она перегружается до  $(1,1...1,2)P_{\max}$  и начинается разгрузка до нуля с фиксацией значений  $P_i$  (подход сверху). Если в режиме разгрузки ошибочно вместо  $P_i = P_3 = 15$  кН установлено 14,5 кН, то необходимо увеличить нагрузку до  $(1,1...1,2)P_i$ , т. е. до 16,5...18 кН, а затем уменьшить до  $P_i = P_3 = 15$  кН — подойти к ней сверху. Повторить калибровку следует не менее трех раз. Нулевая линия в каждой повторности фиксируется (в данном случае) после плавного снятия нагрузки до нуля на образцовом динамометре [23, 47]. Результаты представлены в таблице 5 и утрированно на рисунке 14.

Таблица 5. Результаты калибровки ИИС

| На-<br>грузка,<br>кН | Высота ординаты в повторностях, мм |      |      |                     |      |      |                  | Большая из<br>$h_l - h'_{\min}$<br>и<br>$h''_{\max} - h_l$ | $\delta_{стI},$<br>% | $\kappa_i,$<br>$\frac{\text{кН}}{\text{мм}}$ |
|----------------------|------------------------------------|------|------|---------------------|------|------|------------------|--|----------------------|--|
|                      | при нагрузке $h'$                  |      |      | при разгрузке $h''$ |      |      | средняя<br>$h_l$ |  |                      |  |
|                      | 1                                  | 2    | 3    | 1                   | 2    | 3    |                  |  |                      |  |
| 5                    | 9,8                                | 9,9  | 9,7  | 10,1                | 10,3 | 10,2 | 10,0             | 0,3  | 0,60                 | 0,500  |
| 10                   | 19,2                               | 19,4 | 19,5 | 19,6                | 19,7 | 19,7 | 19,5             | 0,3  | 0,60                 | 0,513  |
| 15                   | 28,7                               | 28,8 | 29,1 | 29,1                | 29,3 | 29,4 | 29,1             | 0,4  | 0,82                 | 0,515  |
| 20                   | 38,8                               | 38,9 | 38,7 | 39,1                | 39,4 | 39,1 | 39,0             | 0,4  | 0,82                 | 0,513  |
| 25                   | 48,7                               | 48,6 | 48,9 | 49,0                | 49,1 | 49,4 | 48,9             | 0,5  | 1,02                 | 0,511  |

Из-за трения в механической части ИИС и гистерезиса разной природы линии нагружения 3 и разгрузки 1 не совпадают. Если измеряют пиковые значения усилия  $P$ , то по величине  $h$  и кривой 3 можно определить их значения. Если измеряют среднее значение силы, то следует пользоваться линией 2, так как ИИС работает в переменном режиме.

Обработка результатов измерений упрощается, когда калибровочная кривая 2 представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат, т. е. ког-

да ИИС имеет линейную характеристику, при которой цена деления или масштаб постоянны. Тогда

$$P = k_{\text{ср}} h,$$

где  $k_{\text{ср}}$  — масштаб записи (в кН/мм. в примере).

Заменяя ломаную линию 2 прямой, т. е. сглаживая опытные данные (см. параграф 5 главы VI), следует подумать о причине изломов линии — иногда конструкцией прибора предусмотрен разный масштаб на разных участках шкалы. После сглаживания можно заметить и определить систематическую ошибку  $\Delta h_{\text{с}}$ , внести поправку в значения  $h_i$ , а затем и во все результаты измерений ординат.

Средний масштаб для прибора с линейной характеристикой после исключения систематической ошибки, если она была, определяется по данным таблицы 5, как [23]

$$\begin{aligned} k_{\text{ср}} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i / h_i = \frac{1}{n} \sum k_i = \\ &= \frac{1}{5} \cdot 2,552 = 0,5104 \text{ кН/мм}, \end{aligned} \quad (\text{IV.16})$$

где  $P_i / h_i = k_i$  — масштаб  $i$ -той ступени.

Судя по  $k_1$ , при калибровке получилась систематическая ошибка. Однако, учитывая, что калибровался прибор 2-го класса точности, а расчеты по формуле (IV.18) показали, что  $\delta_{\text{пр}} < 2\%$ , автор [23] не посчитал целесообразным ее исключить.

**Ошибки при калибровке.** Малую приведенную ошибку  $\delta_{\text{обр}}$  имеет образцовый прибор. Разброс отдельных точек около истинных значений величины характеризует случайную ошибку или вариацию прибора  $\alpha_{\text{ст}}$ . Для каждой ступени приведенную случайную ошибку  $\delta_{\text{ст}i}$  находят как отношение наибольшей абсолютной разности  $\Delta h_{\text{ст}i}$  между средним значением  $h_i$  и значениями  $h'$  или  $h''$  в отдельных повторностях  $i$ -той ступени к предельной высоте ординаты при калибровке  $h_{\text{max}}$ . Например, по данным таблицы 5, для третьей ступени ( $P_i = 15$  кН) найдем  $\delta_{\text{ст}3} = |29,8 - 28,7| / 48,9 = 0,0082 = 0,82\%$ . Максимальное значение  $\delta_{\text{ст}}$  получено при  $i = 5$  и равно  $1,02\%$ , а  $\alpha_{\text{ст}} = \delta_{\text{ст} \text{ max}} P_{\text{max}} = 0,0102 \cdot 25 = 0,255$  кН. Замена ломаной линии прямой 2 ведет чаще



всего к случайной по природе ошибке, так называемой ошибке линейности  $\alpha_{\text{л}}$ .

Для каждой ступени

$$\alpha_{\text{л}} = |h_i k_{\text{ср}} - P_i| = \Delta h_{\text{л}i} k_{\text{ср}}, \quad (\text{IV.17})$$

а для оценки ошибки прибора берется ее максимальное значение.

При проверке прибора предельная приведенная ошибка

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\text{ст}} + \alpha_{\text{л}}}{x_{\text{max}}}. \quad (\text{IV.18})$$

Обобщая, однако, литературные данные и современные рекомендации, можно прийти к следующим выводам. Систематическую ошибку при калибровке легко найти и учесть как поправку. Следует согласиться с выводами [18, 78], что все остальные ошибки калибровки представляют собой неопределенности, близкие по природе к случайной ошибке при надежности порядка 0,95 (а при многоступенчатой калибровке — до 0,99) и имеет смысл рассматривать и учитывать их как случайные ошибки. Тогда по формуле сложения случайных ошибок (IV.15) при отсутствии корреляции между ними получим ошибку калибровки

$$\sigma_{\text{кал}}^2 = \sigma_{\text{ст}}^2 + \sigma_{\text{л}}^2 + \sigma_{\text{обр}}^2, \quad (\text{IV.18 а})$$

где  $\sigma_{\text{ст}} = \alpha_{\text{ст}}/3$ ;  $\sigma_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}}/3$ ;  $\sigma_{\text{обр}} = \Delta_{\text{обр}}/3$ .

А так как обычно  $\sigma_{\text{ст}} \gg (\sigma_{\text{л}}, \sigma_{\text{обр}})$ ,

$$\text{то } \sigma_{\text{кал}} = \sigma_{\text{ст}}. \quad (\text{IV.19})$$

Такое решение без всяких обоснований можно найти в источнике [47].

При обработке осциллограммы (см. рис. 8) путем замера ординат и вычисления средней высоты ординаты значение ошибки, обусловленной  $\sigma_{\text{ст}}$ , сведется к нулю, так как система работает в переменном режиме нагрузки-разгрузки, но  $\sigma_{\text{кал}}$  можно определить по (IV.18а; IV.19). Если калибровка выполнена исследователем самостоятельно (как в примере с моментом, с. 106) и ему известен характер ошибки, то можно попытаться уменьшить ошибку измерения постоянной величины до уровня, близкого к ошибке образцового прибора, увеличивая число измерений. Если это не так, то даже, выполнив прибором 3...5 измерений постоянной

величины и уточнив этим среднее значение, не всегда можно считать, что уменьшена ошибка — она соответствует классу точности прибора [33], хотя и в этом случае рекомендуют [78] поступать, как и в первом, в силу случайности  $\alpha_{ст}$  по ее определению. Утверждается [34] без достаточного обоснования, что ничего, кроме предельного ее значения, об этой ошибке неизвестно, а это, как показано выше, не всегда так.

Отметим, что калибровку ИИС во многих случаях необходимо проводить после установки измерительных звеньев на объекте, так как механизмы объекта во многом определяют значение вариаций, а установка их после калибровки может привести к большой (и неизвестной) систематической ошибке. В целях уменьшения этой ошибки калибровку следует выполнять в условиях, соответствующих условиям измерений (по температуре, давлению и т. п.). Определение систематических динамических ошибок рассмотрено ранее.

Масштаб и ошибку прибора с нелинейной характеристикой определяют для каждой степени аналогично изложенному.

Очень часто калибровка требует от исследователя большой изобретательности, понимания процесса измерения и факторов, определяющих точность результата. Калибровка ряда приборов описана в предлагаемой литературе [22, 23, 47, 69] и периодических изданиях (см. библиографию в [38]).

## **9. Систематическая ошибка, пути ее выявления, уменьшения и исключения**

Источники систематической ошибки те же, что и источники случайной.

Систематические ошибки удобно разделить на пять групп по характеру проявления, причинам, их вызывающим и путям устранения или учета.

*Группа 1* — ошибки, постоянные для всех измерений данным прибором. Это главным образом «сдвиг нуля» по разным причинам: разбаланс моста, изгиб стрелки прибора и т. п.

*Группа 2* — ошибки, постоянные для данных условий и метода измерений, вызываемые главным образом влиянием окружающей среды, причем влияние это полностью известно. Измеряя расход топлива объемным

методом при температуре  $T$ , отличной от нормальной  $T_0$ , получают результат с систематической ошибкой, зависящей от  $T - T_0$ , так как объем топлива  $X$  и его температура  $T$  связаны зависимостью вида

$$X = X_0[1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (\text{IV.20})$$

Мощность двигателя при снятии регуляторной характеристики связана с температурой окружающей среды  $t^\circ\text{C}$  и атмосферным давлением  $P_a$ , мм рт. ст., зависимостью

$$M_{\omega} = M_{n\omega_n} \left( 1 - \frac{t - 20^\circ}{10} \cdot 0,015 - \frac{p_a - 751}{10} \cdot 0,0135 \right), \quad (\text{IV.21}),$$

где  $M_n$  и  $\omega_n$  — измеренные значения момента и скорости.

*Группа 3.* Ошибки, постоянные для данных условий и метода измерения, но отличающиеся от ошибок группы 2 тем, что источники ошибок трудно контролируемые. Параметры или характеристики источника часто монотонно изменяются вместе или параллельно с изменяемым параметром, а формулы аналогичные (IV.20 и IV.21) отсутствуют. К источникам таких ошибок относятся старение объекта (затупление лемехов); старение первичных преобразователей (датчиков), ведущее к плавному изменению ошибки; изменение твердости почвы от одного края поля к другому; приобретение механизатором опыта при работе с объектом или потеря у него интереса к исследованию и т. п.

*Группа 4* — ошибки, обусловленные свойствами измеряемого объекта, часто связанные с качеством его изготовления. Определение площади сечения овального цилиндра по результатам единичного измерения его диаметра получается с систематической ошибкой. Если для измерения электропроводности материала взят отрезок проволоки из этого материала, имеющий какой-либо дефект (например, трещину, утолщение), то сопротивление этого куска будет неверно характеризовать электропроводность материала.

*Группа 5* — ошибки, о которых мы не подозреваем, хотя их значения могут быть большими [34]. Например, измеряя плотность металла по его объему и массе, можно получить результат с грубой ошибкой, если образец содержит внутри пустоты или раковины. Пример прост и легко заметить ошибку, если предположить, что она может быть. История развития точных наук показыва-

ет, что от такого рода ошибок не свободны даже самые тщательные измерения.

**Исключение или уменьшение систематических ошибок**, а также их учет — одна из основных забот каждого экспериментатора. Ниже рассмотрены основные возможные пути решения этого вопроса. Но следует сразу оговориться, что их применение не всегда просто и не всегда ведет к желаемым последствиям, особенно когда они используются формально, без анализа и учета условий опытов и сущности изучаемого явления.

*1-й путь* — наиболее общий и эффективный — измерение величины другим методом или прибором: вместо измерения диаметра некруглого цилиндра с целью определения объема его можно опустить в мерный сосуд; вместо объемного измерения топлива использовать весовое.

*2-й путь* — калибровка прибора или ИИС: ошибки групп 1 и 2 определяют сравнением показаний прибора с эталоном; ошибки группы 3 — калибровкой в условиях опытов; ошибки прибора можно уменьшить, учитывая результаты статической и динамической калибровки с определением вариации прибора и его систематических ошибок в разных частях шкалы.

*3-й путь* — вычисление поправок по известным формулам, типа (IV.20 и IV.21) для учета ошибок группы 2-й. Допускают, что можно пренебречь поправкой порядка  $0,1 \sigma_{\text{хс}}$ , если результат измерения не используется в сложных расчетах и отсутствие поправки не ведет в конечном счете к большим ошибкам. Иногда для учета такой ошибки проводят специальное исследование или расчет.

*4-й путь* — перевод систематической ошибки в случайную. Используется в основном два приема: рандомизация (выполнение измерений в случайном порядке) для уменьшения ошибок группы 3 и многократное измерение для уменьшения ошибок групп 4 и 5.

**Пример IV.10.** Исследуется зависимость равномерности глубины вспашки от разных факторов. Опыты поставлены следующим образом. При скорости движения  $v_p = v_1$  выполняются проходы с глубинами  $a = a_1; a_2; \dots; a_n$ ; проходы с каждым значением глубины выполняются при углах наклона линии тяги  $\alpha = \alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_m$ . Далее все комбинации  $a$  и  $\alpha$  повторяются при  $v_p = v_2 > v_1$ , затем при  $v_p = v_3 > v_2$  и т. д. Эксперимент идет по классической схеме — меняется в каждом опыте значение лишь одного параметра при неизменности остальных. По данным опытов строятся зависимости

неравномерности глубины вспашки, оцениваемой  $\sigma_a$ , от  $v_p$  при разных значениях  $a$ .

Одна из этих зависимостей представлена на рисунке 15, а. Однако она противоречит действительности. В данном случае на колебания глубины, большее чем  $v_p$  влияние, оказал износ лемехов, который не был учтен методикой. Если менять  $v_p$  в случайном порядке, определив его жребием или с помощью таблиц случайных чисел [8, 33 и др.], например в порядке  $v_3-v_5-v_2-v_6-v_1-v_4$ , то данные получаются с большим разбросом, но они будут группироваться около истинной зависимости (рис. 15, б)

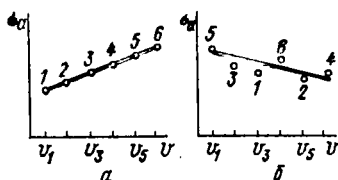


Рис. 15. Опытные зависимости при различных планах опытов: а — последовательном; б — рандомизированном (числа у точек показывают порядок выполнения опытов).

Широко известно, что диаметр цилиндра измеряют многократно, а затем находят среднее значение; для определения электропроводности металла измеряют сопротивление нескольких кусков проволоки; аналогично можно поступить в примере с определением плотности металла, взяв несколько образцов для измерений. Однако этот прием может и не дать желаемого результата, так как не всякий способ усреднения автоматически исключает подобные систематические ошибки. В [34] дан пример с измерением некруглого цилиндра постоянного диаметра, когда усреднение не имеет смысла (если из вершин равностороннего треугольника провести дуги радиусом, равным его стороне, то получим некруглое основание с постоянным диаметром).

Перевод систематической ошибки в случайную позволяет исключить многие неизвестные или трудно определяемые ошибки. Рандомизация при этом является одним из широко используемых методов.

Конечно, указанные пути не ограничивают возможности устранения или определения систематической ошибки. В каждом конкретном случае могут быть использованы специфические приемы. Например, часто при исследованиях и испытаниях агрегатов приходится работать на полях с уклонами. Они тоже ведут к систематической ошибке. Но ошибку легко исключить, проводя опыт при движении «туда» и «обратно». Можно и рассчитать ее, однако проще исключить.

## 10. Общая ошибка измерения и ошибка косвенных измерений

Общую ошибку измерения необходимо знать для того, чтобы воспользоваться результатами измерений при проектировании конструкций, производственных процессов и т. д.

Общая ошибка измерения учитывает как систематические, так и случайные составляющие, особенно если они близки по значению. Возникает вопрос о сложении ошибок разной природы.

Вопрос решается просто, когда систематическая ошибка известна по значению и знаку — тогда она используется как поправка. Если ошибка прибора неизвестна по знаку, а предельное значение ее  $\Delta_{\text{пр}}$ , то суммарная ошибка средней  $\bar{x}$  при надежности  $H=P$  будет

$$\Delta_{\bar{x}, H} = \pm \Delta_{\text{пр}} + u_{\text{пр}} \bar{x}. \quad (\text{IV.22})$$

Ошибку калибровки считают предельной случайной или неопределенностью, распределенной по нормальному закону, и общую ошибку единичного измерения находят как [18, 34, 78]

$$\Delta_{x \text{ или}} = \sqrt{\Delta_{\text{пр}}^2 + (3\sigma_x)^2}. \quad (\text{IV.23})$$

Большинство современных рекомендаций не без основания случайности ошибки прибора (типа приведенных на с. 127) сводится к формуле (IV.23). Это позволяет рассматривать ошибки разной природы на общей основе, легко находить ошибки, соответствующие разной надежности, и выполнять разные расчеты, связанные с определением точности опытов, необходимого числа измерений, особенно при косвенных измерениях.

Общая формула для расчета случайной, а с учетом (IV.23) и общей ошибки косвенных измерений величины  $z$ , представляющей собой функцию нескольких величин ( $z=f(x, y, r)$ ), выглядит так:

$$\Delta_{\bar{z} \text{ или}}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \Delta_{\bar{x} \text{ или}}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \Delta_{\bar{y} \text{ или}}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)^2 \Delta_{\bar{r} \text{ или}}^2, \quad (\text{IV.24})$$

где  $\Delta_{\bar{x}}$ ,  $\Delta_{\bar{y}}$ ,  $\Delta_{\bar{r}}$  — суммарные случайные или общие ошибки измерений величин  $x$ ,  $y$  и  $r$ .

Формула (IV.24) верна, если распределения всех ошибок нормальные (как это оказывается или прини-

мастся в большинстве случаев), и достаточно точна в случае симметричных распределений. В нее можно подставлять другие ошибки одинаковой надежности, т. е.  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_r$  или  $\rho_z$ ,  $\rho_x$ ,  $\rho_y$ ,  $\rho_r$  и так далее. При этом принимают, что ошибка измерения величины  $z$  распределена тоже по нормальному закону (хотя, как указано на с. 115 на примере с диаметром и массой шарика, это может не соответствовать действительности и можно лишь допустить нормальность распределения).

Ошибки измерений или неопределенности  $\Delta_{\bar{x}}$ ,  $\Delta_{\bar{y}}$ ,  $\Delta_{\bar{r}}$  должны быть независимы.

При определении коэффициента преломления призмы, например,

$$N = \frac{\sin[(A+B)/2]}{\sin(A/2)}$$

использовать ее нельзя, если рассматривать  $N$  как функцию отношения двух величин:  $x = \sin[(A+B)/2]$  и  $y = \sin(A/2)$  — они обе зависят от  $A$ , и ошибки их измерения взаимосвязаны. В таком случае для  $N$  нужно найти более общее выражение.

Для сумм и разностей типа  $z = x \pm y$  формула (IV.24) упрощается:

$$\Delta_{z, \text{lim}}^2 = \Delta_{x, \text{lim}}^2 + \Delta_{y, \text{lim}}^2. \quad (\text{IV.25})$$

Для произведения и частного типа  $z = xyr$ ;  $z = xy/r$  удобно пользоваться относительными ошибками (%):

$$\delta_{z, \text{lim}}^2 = \delta_{x, \text{lim}}^2 + \delta_{y, \text{lim}}^2 + \delta_{r, \text{lim}}^2. \quad (\text{IV.26})$$

Легко заметить, что из формул (IV.25 и IV.26) следуют те же выводы, что и из (IV.15).

Для некоторых других функций ошибки можно вычислять по формулам:

$$\begin{aligned} z &= kx^b; \quad \Delta_{z, H} = zb \Delta_{x, H}/x; \\ z &= ke^x (x > 0); \quad \Delta_{z, H} = z \Delta_{x, H}; \\ z &= k \ln x; \quad \Delta_{z, H} = z \Delta_{x, H}/(x \ln x); \\ z &= k \sin x; \quad \Delta_{z, H} = z \Delta_{x, H}/\text{tg } x. \end{aligned} \quad (\text{IV.27})$$

Пример IV.11, приведенный далее, иллюстрирует определение общей ошибки. Интересен подход к ее определению, представленный в [39, с. 77...84].

Ошибка косвенных измерений в отличие от (IV.24) определялась по формулам вида

$$\Delta_{z \text{ lim}} = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta_{x \text{ lim}} + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta_{y \text{ lim}}. \quad (\text{IV.28})$$

Формула (IV.28) предполагает, что ошибки всех измерений предельные и отклонены в сторону «+» и «-» крайне неблагоприятно, чего в действительности не бывает. Для надежности результата в особо ответственных случаях требуется исследовать ошибку, например, моделированием системы [44], а не завышать ее расчетом. Подобное завышение ошибки часто ставит исследователя в тупик, так как он вынужден исходя из этого планировать применение приборов и методов, обеспечивающих повышенную точность, а иногда даже невыполнимую. Это ведет к неоправданным затратам труда и средств, затягиванию и срыву работ.

Рекомендуется в исследованиях по механизации формулу (IV.28) использовать только в тех случаях, когда это предусмотрено соответствующим отраслевым стандартом (допустим, на испытания машин) для возможности сравнения результатов, полученных в разных условиях разными исследователями, а также при наличии в выражении (IV.28) двух-трех слагаемых при однократных измерениях параметров приборами, которые сам исследователь не калибровал.

## 11. Анализ ошибок при планировании эксперимента

Вопросы точности измерений находят широкое применение при планировании эксперимента. Они позволяют решить, какими приборами, сколько раз, в течение какого времени и какими методами выполнять измерения.

Анализ систематической ошибки определяет, какие неуправляемые параметры следует измерять в опыте (температура и давление воздуха, температура двигателя и т. д.) для внесения поправки в результат, в каком порядке проводить опыты: последовательно или в случайном порядке и т. п.

Соотношение значений систематической (или неопределенности) и случайной ошибки определяет количество измерений. Если ошибка прибора больше случайной ошибки, вызываемой другими факторами, например



изменчивостью величины, следует проводить одно измерение. Если ошибка измерения определяется случайной ошибкой, то путем увеличения числа измерений ее следует свести к значению, меньшему неопределенности (ошибки прибора) или к значению, обеспечивающему заданную общую ошибку. Число измерений находят по (IV.11) или методом последовательного приближения (с. 112).

Эффективен анализ ошибки при косвенных измерениях.

**Пример IV.11.** Удельный расход топлива  $g_e$  определяется по общему расходу топлива  $G_0$  за время опыта  $T$ , моменту на валу двигателя  $M$  и частоте его вращения  $\omega$ :

$$g_e = G_0 / (M \omega T). \quad (IV.29)$$

Допустим, предельная ошибка отыскания  $g_e$  равна  $\delta_{glim} = 3\%$ . Ошибка взвешивания на весах (т. е. ошибка прибора)  $\Delta_{пр glim} = 5$  г, случайная ошибка в 3...4 раза меньше ошибки прибора и поэтому  $\Delta_{glim} = 5$  г. У секундомера ошибка прибора  $\Delta_{пр tlim} = 0,2$  с. Предельные случайные ошибки, связанные с запаздыванием включения и выключения секундомера вручную  $\Delta_{tlim} = \Delta'_{tlim} = 0,2$  с. Тогда по (IV.23)  $\Delta_{T \Sigma lim} = \sqrt{0,2^2 + 0,2^2 + 0,2^2} = 0,35$  с. Момент  $M = 250$  Н·м, а  $\Delta_{пр Mlim} = 5$  Н·м. Для тахометра  $\Delta_{пр \omega lim} = 17$  об/мин при  $n = 1700$  об/мин.

По формуле (IV.26) имеем

$$\left(\frac{\Delta g}{g_e}\right)^2 = \left(\frac{\Delta G}{G_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2. \quad (IV.30)$$

Неизвестно время опыта  $T$  и расход топлива за опыт  $G_0$ . Учитывая, что  $G_0 \approx g_0 T$ , следует найти время опыта  $T$ , обеспечивающее заданную точность определения  $g_e$ . Положим,  $g_0 = 4$  г/с (при измерении это можно уточнить). Тогда  $(0,03)^2 = 5/(4T)^2 + (0,35/T)^2 + (0,02)^2 + (0,01)^2$  или

$$0,004 = \frac{1,56}{T^2} + \frac{0,14}{T^2}; \quad T^2 = \frac{1,70}{0,004}; \quad T = 60 \text{ с.}$$

Рассматривая систематические ошибки, решим, что необходимо измерять температуру и давление воздуха. В произведение  $M\omega$  необходимо ввести поправки в соответствии с (IV.21). В противном случае ошибка определения  $g_e$  превысит 3%. Опыт можно проделать три раза, тогда в силу всего изложенного выше, ошибку измерения  $g_e$  можно уменьшить в  $\sqrt{3}$  раз.

## 12. Ошибка округления и точность вычислений

При записи результатов измерений и использовании их в расчетах всегда приходится делать округления, в противном случае большое число значащих цифр со-

здает ложное впечатление о большой точности результата.

Количество верных знаков числа отсчитывается от первой значащей цифры числа до первой значащей цифры его абсолютной ошибки [64]: если, например, для числа  $x=64,785$  абсолютная ошибка  $\Delta_{x \text{ lim}}=0,057$ , то число  $x$  имеет три верных знака (6, 4, 7), а остальные знаки сомнительные. Ориентировочно можно считать, что наличие одного верного знака соответствует ошибке порядка 10%, двух — ошибке порядка 1%, трех — 0,1% и т. д.

Чтобы уменьшить накопление ошибок округления при вычислениях, во всех данных для расчета следует сохранять несколько сомнительных знаков: если количество выполняемых действий с результатами измерений до получения окончательного результата измеряется десятками, надо сохранить один-два сомнительных знака, сотнями — два-три, заменяя в целых числах нулями остальные. Сохранение одного сомнительного знака соответствует округлению абсолютных и относительных ошибок до одной значащей цифры, сохранение двух — округлению до двух значащих цифр и т. д. Следует иметь в виду, что сомнительный знак не обязательно неверный, так как оценки ошибок в большинстве случаев оказываются завышенными.

В окончательных результатах целесообразно сохранять один сомнительный знак. Другими словами, ошибка вычислений должна быть меньше на порядок (т. е. в 10 раз) ошибки измерений.

**Пример IV.12.** В примере IV.11 при  $T=70$  с (так как оказалось  $g_0=3,4$  г/с) получено  $g_e=273,499$  г/кВт·ч с  $\delta_{g \text{ lim}}=3,04\%$  или  $\Delta_{g \text{ lim}}=8,3$  г/кВт·ч. В соответствии с вышеизложенным в значении  $g_e$  два верных знака (2 и 7) следует записать результат как 273 г/кВт·ч, а ошибки 3% и 8 г/кВт·ч.

К данной главе рекомендуется литература: [2, 18, 19, 21, 22, 23, 33, 34, 38, 39, 44, 47, 48, 49, 64, 69, 78; 81].

# Глава V

## Программа и методика эксперимента

### 1. Общие положения

Программа эксперимента включает в себя две части: перечень зависимостей, факторов и их характеристик, которые нужно установить или проверить в данных экспериментах, и расчет (план) объема и продолжительности работ, потребности в рабочей силе, площадях, оборудовании, материалах и т. д. В программе дается ответ на вопрос: «Что необходимо получить в результате эксперимента для решения задач исследования и что для этого требуется?». В отчетах о научно-исследовательских работах и диссертациях вторая часть программы почти всегда опускается, но она всегда разрабатывается и обсуждается вместе с первой частью перед проведением эксперимента.

Исходные данные для разработки программы: задачи исследования, гипотеза и ее теоретические разработки; для расчетов по организации опытов — методика эксперимента.

**Методика экспериментов** — совокупность способов и приемов получения зависимостей и значений параметров, намеченных программой, и вычисления соответствующих показателей. Методика — технология исследования, в ней дается ответ на вопрос: «Как выполнить отдельные пункты программы экспериментов?».

Методика включает в себя выявление основных факторов и контролируемых параметров; обоснование точности измерений; выбор способов измерения, фиксации, нейтрализации и изменения параметров, обоснование пределов и интервалов их изменения; установление порядка проведения опытов и их планирование; разработку мероприятий по подготовке к опытам машин, прибо-

ров и рабочего участка; выбор способов контроля за ходом эксперимента.

Основные исходные данные для разработки методики: программа экспериментов; необходимая точность результатов измерений; математическая модель явления, если она есть; литературные данные о методах измерений и измерительной аппаратуре, о методах обработки и анализа опытных данных; материальная база (она определяет, например, наличие приборов, машин и средств для их приобретения); сроки исследования (когда результат срочно нужен для принятия решения, приходится устанавливать количественные соотношения без раскрытия их сущности — это предъявляет определенные требования к скорости получения и обработки информации).

Следует еще раз подчеркнуть значение методов обработки и анализа опытных данных как исходных положений при разработке программы и методики. Они могут показать, особенно малоопытному исследователю, возможности эксперимента, желаемые вид и форму представления результатов измерений, помочь с выбором прямо измеряемых величин и приборов и т. д. Поэтому целесообразно предварительно хотя бы бегло ознакомиться с ними для принятия конкретных решений по отдельным вопросам настоящей главы.

В данной главе рассмотрены подробно этапы разработки методики и проведения экспериментов по классической схеме. Особенности методов факторного планирования экспериментов (теории эксперимента) изложены в параграфе 9 главы III.

Необходимо отметить, что отдельные вопросы программы, так же как и методики, взаимосвязаны, решение многих из них проводится параллельно и возможно не в том порядке, в каком они указаны здесь. Зависит это от задач исследования, сроков, материальной базы, опыта исследователя и т. д. При разработке методики часто приходится возвращаться к уже решенным вопросам и принимать новые решения, так как они чаще всего получаются перебором возможных вариантов и не всегда можно учесть с достаточной полнотой влияние решений, принимаемых в начале разработки методики, на последующие.

Следует напомнить, что решение многих методических вопросов упрощается в связи с тем, что ряд мето-

дик разработан и представлен в ГОСТах, отраслевых нормалях и методиках, используемых машиноиспытательными станциями и другими организациями при испытаниях машин. В этих документах можно найти методики определения и измерения показателей и параметров, характеризующих условия испытания машин и обрабатываемый материал (таких, как твердость и влажность почвы, влажность хлебной массы, температура воздуха и атмосферное давление), качество работы машин (глубина обработки, ширина захвата, повреждаемость корней свеклы и др.), энергетические свойства машин (снятие регуляторной характеристики двигателя, тяговой — трактора, динамометрирование машин и т. п.), экономическую эффективность машин и агрегатов (производительность, расход топлива и др.), эргономические качества машин (температура, запыленность и шум в кабине машины и т. п.), надежность (наработка на отказ, гамма-ресурс и др.). Для определения некоторых показателей отдельными исследователями разработаны специальные методики, которые можно найти в литературе.

При измерениях этих показателей и параметров исследователю всегда целесообразно использовать указанные методики и ГОСТы с предварительным анализом возможности их применения и ссылкой на них.

Однако исследователь во многих случаях сталкивается с нестандартными параметрами, показателями и измерениями, и ему приходится разрабатывать частные методики для определения отдельных параметров и общую методику эксперимента.

Решение вопросов программы и методики эксперимента далее иллюстрируется общим для всей главы примером, в основу которого положено выполненное исследование.

Современные энергонасыщенные колесные тракторы используются на пахоте с пониженной эффективностью из-за большого буксования ведущих колес. Одним из путей улучшения использования их энергетических возможностей является использование в агрегате с ними плугов, имеющих активные (ведущие) рабочие органы, в частности, дисковые ножи с приводом, участвующие в формировании движущей силы. Возникает вопрос о рациональном распределении энергии между ведущими колесами трактора и дисками-двигателями, о параметрах и режиме их работы. Так как на данном этапе исследований таких рабочих органов решение в общем виде (т. е. для всех тракторов) довольно трудоем-

ко, оно ограничено рассмотрением агрегата с трактором, например, МТЗ-80.

Анализ выполненных исследований привел к постановке темы «Исследование силовых и энергетических параметров пахотного агрегата с дисками-двигателями на примере МТЗ-80+ПН-3-35» и задач этого исследования.

**Задача 1:** Вскрыть механизм взаимодействия плоского диска-двигателя с почвой и разработать методику расчета его силовых параметров.

**Задача 2:** Найти оптимальный по силовым и энергетическим параметрам режим работы диска-двигателя.

**Задача 3:** Выявить технико-экономическую эффективность применения дисков-двигателей на лемешно-отвальном плуге в агрегате с трактором МТЗ-80.

В теоретической части работы выведены аналитические выражения для определения движущей  $R_x$  и вертикальной выталкивающей  $R_z$  сил на диске-двигателе. Из них видно, что энергетические и силовые параметры диска-двигателя зависят от его радиуса  $r$  и толщины  $b$ , глубины хода  $a$ , кинематического коэффициента  $\lambda$  (отношения окружной скорости диска  $v_d$  к рабочей скорости агрегата  $v_p$ ), удельного давления почвы на боковую поверхность диска  $p$ , коэффициента трения почвы о диск  $f$  и удельного сопротивления почвы  $q$ , проходящегося на единицу площади лезвия.

Исходя из задач исследования и теоретических разработок гипотезы, *программой экспериментов предусмотрено:*

1. Проектирование и изготовление полевой экспериментальной установки с дисками-двигателями и соответствующего приспособления к плугу ПН-3-35.

2. Определение экспериментальных зависимостей  $R_x$  и  $R_z$  от  $a$  и  $\lambda$  и сравнение их с расчетными.

3. Определение зависимости от  $a$  и  $\lambda$  мощностей на дисках  $N_d$ , на ведущих колесах трактора  $N_k$  и суммарной  $N_c$ , а также общих затрат энергии на работу агрегата.

4. Сравнительные испытания пахотных агрегатов с обычным плугом и плугом с дисками-двигателями.

Программой не предусмотрено исследовать влияние радиуса диска и его толщины на выходные параметры. Они взяты постоянными с учетом литературных данных и конструктивных соображений. Работа, намеченная в первом пункте, в программах встречается очень редко. Формулировка четвертого пункта не конкретна, хотя и ясна из задачи 3—следовало указать: ... «с целью выявления экономической эффективности применения дисков-двигателей на плуге».

Вторая часть программы разрабатывается после и на основе решений вопросов методики.

## **2. Выявление факторов, определяющих явление, и контролируемых параметров**

**Выявление основных факторов.** Все факторы, оказывающие влияние на изучаемое явление, можно разделить на основные и дополнительные; основные оказыва-

ют большое влияние, дополнительные — малое и ими часто можно пренебречь.

Можно выделить некоторые приемы и этапы выявления основных факторов.

1. Выявление основных факторов начинается при разработке гипотезы и теоретических положений, на этапах, где явление идеализируется с учетом данных (литературных) других исследований и общих закономерностей. Часто обоснованное деление некоторых факторов на основные и не основные на этой стадии исследования оговаривается в допущениях.

Для опытов с диском (п. 2 программы) теоретическая разработка гипотезы выявила основные факторы, указанные под формулировкой задач на с. 140. Кроме этого, из теоретических соображений легко предположить, что силы — движущая  $R_x$  и выталкивающая  $R_z$  — зависят от рабочей скорости  $v_p$ . Зависят они и от твердости  $\rho_n$ , механического состава и влажности  $W$  почвы и т. д., определяющих условия работы, но сложное влияние этих факторов учтено удельным давлением почвы на диск  $p$ , коэффициентом трения  $f$  и удельным сопротивлением  $q$ .

2. Если нельзя воспользоваться известными законами, а также нужно проверить значимость отдельных факторов и полноту их перечня, проводят наблюдение (пассивный эксперимент) за работой объекта или специальный поисковый эксперимент.

В опытах с диском целесообразно провести поисковые опыты для выявления влияния  $v_p$  — возможно оно мало (они показали, что действительно мало). Методика их аналогична методике основных опытов, но много проще, так как поисковые опыты проводятся на трех скоростях (вид зависимости грубо можно определить по трем точкам) при постоянстве и реальных значениях остальных параметров.

Проведение поисковых опытов часто не включают в программу эксперимента, иногда они выполняются на первой стадии теоретических разработок гипотезы и освещаются в соответствующей ей части отчета (работы).

3. При наличии аналитических зависимостей значимость фактора, входящего в нее, можно выявить предварительно путем расчетов. Определяется при этом значимость слагаемых, в которые он входит.

4. При исследованиях сложных динамических систем значимость фактора можно определить путем моделирования на ЭВМ с последующей проверкой на натуре в поисковых опытах.

5. Если нет теоретических и простых поисковых пу-

тей выявления основных факторов, используется теория планирования эксперимента (объект «черный ящик»).

Выявляя основные факторы, всегда необходимо учитывать, что деление факторов на основные и дополнительные — условно, роль факторов в одних условиях может быть большой, а в других его влиянием можно пренебречь.

**Нейтрализация факторов.** При проведении экспериментов приходится нейтрализовать некоторые факторы, т. е. исключать (предотвращать) изменение фактора и влияние этого изменения. Выполнение этой операции позволяет сократить объем измерений и повысить их точность. Исследователь всегда стремится нейтрализовать дополнительные факторы. Часто нейтрализуют и основные. Выполняя серию (группу) опытов при схеме однофакторного эксперимента, например, исследователь исключает изменение всех основных факторов, кроме одного, влияние которого определяется в данной серии (избранного фактора). Нейтрализация основных факторов особенно важна.

Первый и основной путь нейтрализации факторов — выбор условий проведения опытов. Они могут быть: лабораторные, лабораторно-полевые и полевые. Соответственно называют и опыты.

*Лабораторные опыты* исключают влияние изменений всех факторов, определяющих внешние условия работы. Это опыты в почвенном канале, где характеристики почвы и поля стабильны; опыты с высевом семян на липкую ленту, где семена не смещаются после падения в борозду, а высеваящий аппарат не колеблется; исследование влияния параметров топливного насоса на мощность двигателя — на стенде; наплавка специальных образцов, а не изношенных деталей и т. д.

Лабораторные опыты широко используются в исследованиях конструкций машин, их механизмов и узлов, они хорошо выявляют закономерности, требуют малых затрат труда, исключают сезонность, но каждый в отдельности опыт имеет малое производственное значение — нужен синтез ряда таких опытов с проверкой общего результата вне лаборатории.

Опыты для определения зависимостей сил движущей  $R_x$  и выталкивающей  $R_z$  от глубины хода диска  $a$  и кинематического коэффициента  $\lambda$  целесообразно провести в лабораторных условиях — в почвенном канале, если есть такая возможность.



*Лабораторно-полевые опыты* проводят в заранее подготовленных условиях со стабильными характеристиками: поле выбирают ровным, с равномерной твердостью почвы, специально обрабатывают его перед опытом (выравнивают, боронуют, поливают и т. д.), с заданной культурой и т. д. Опыт проводят в определенные часы, без маневрирования скоростью и др. Результаты этих опытов ближе к производственным показателям, чем лабораторных.

Опыты в лабораторно-полевых условиях — основной вид опытов при исследованиях в области механизации сельского хозяйства.

Основные опыты по всем пунктам программы эксперимента с дисками-двигателями следует провести именно в этих условиях.

*Полевые опыты* — проверка основных выводов исследования в производственных условиях, когда влияют все факторы.

В этих условиях следует провести заключительные опыты по определению экономической эффективности применения дисков-двигателей.

Существует ряд методов нейтрализации факторов [18].

*Метод рандомизации* широко используется при нейтрализации основных и дополнительных факторов, чаще всего имеющих случайный характер или связанных со старением объекта (сопротивление почвы, урожай и микрорельеф на разных участках одного поля; квалификации механизатора и техническое состояние машин при определении эффективности технологической схемы процесса уборки культуры; старение электролита при электрохимическом наращивании размера и др.).

*Метод резкого изменения избранного фактора* при относительно малом изменении остальных используют практически во всех экспериментах при установлении опытных зависимостей.

В опытах с диском по п. 2 программы в лабораторно-полевых условиях отыскивают зависимость  $\{R_x, R_z\} = f(a)$  при  $\lambda = \text{const}$ . В этой серии опытов резко изменяют глубину хода дисков: 4 см в первом опыте, 7 см — во втором, 10 см — в третьем и т. д. При этом скорость движения  $v_p$  и коэффициент  $\lambda$  оставляют или поддерживают практически постоянными. В другой серии опытов резко изменяют  $\lambda$  при  $(v_p, a) = \text{const}$ .

*Метод контрольных опытов.* Опыт проводят так, что изменяющиеся (в силу своей природы) факторы действуют сразу на несколько градаций избранного. При определении влияния параметров корпуса плуга на его сопротивление разные корпуса ставят на один (динамометрический) плуг, который позволяет замерить сопротивление отдельных корпусов, работающих практически в одинаковых условиях. Этот метод очень широко используется при сравнительных испытаниях машин и их рабочих органов. Машины разной конструкции движутся параллельно по соседним проходам или работают на соседних деланках.

Этот метод следует использовать в заключительных опытах с дисками по п. 4 программы опытов.

*Метод разных знаков.* Нейтрализуемому фактору «придают» сначала положительное, а затем отрицательное значение, и при вычислении среднего значения его сводят к нулю. Метод очень часто используют для нейтрализации уклона в лабораторно-полевых опытах путем выполнения замеров при движении «туда» и «обратно».

В заключение отметим, что все эти методы чаще всего используют в каждом эксперименте в сочетании один с другим.

**Выявление контролируемых параметров.** Решив вопросы о факторах, определяющих явление, об условиях опытов и методах нейтрализации отдельных факторов, можно выбрать контролируемые (измеряемые в опытах) факторы и параметры.

Их можно разделить на несколько групп: управляемые (избранные) параметры, изменяемые по плану исследователя; основные выходные показатели (в опытах определяются их зависимости от управляемых); характеристики дополнительных и основных нейтрализуемых факторов, которые могут зависеть от управляемых и влиять на выходные показатели; независимые (внешние) переменные, характеризующие условия работы; параметры, необходимые для построения расчетных зависимостей.

В опытах с дисками-двигателями контролируют параметры всех групп.

*Управляемые параметры* в пп. 2 и 3 программы — глубина  $a$  и коэффициент  $\lambda$ , в п. 4 — тип плуга (с дисками и без них).

*Выходные показатели:* в п. 2 программы — силы  $R_x$ ,  $R_z$ ; в п. 3 — мощности  $N_d$ ,  $N_k$ ,  $N_e$ , энергия  $A$ ; в п. 4 — производительность  $\omega$ , расход топлива  $G_t$ , буксование ведущих колес  $\delta$ .

*Характеристики дополнительных и нейтразуемых основных факторов:* например, глубина вспашки  $h$  и ширина захвата  $b_n$  могут зависеть от типа плуга при определении  $\omega$ ,  $G_t$ ,  $\delta$  и могут оказывать влияние на выходные показатели, которое нужно учитывать. Они являются источниками систематических ошибок, которые трудно определить, а часто и предотвратить.

Например, при увеличении скорости  $v_p$  плуг вместе с диском будет немного выглубляться, а поддерживать во всех опытах одинаковую глубину обработки практически невозможно. Необходимо оценить эту разницу и попытаться учесть при обработке результатов опытов.

Независимые (внешние) переменные характеризуют данные опыта, привязывая их к его условиям. Измерение этих переменных позволяет учесть их влияние на результаты измерений и внести в них поправки, дает возможность оценить и использовать эти данные другим исследователям (и практикам), обобщить результаты многих исследователей.

В рассматриваемом примере к ним следует отнести твердость  $\rho_n$  и влажность  $W$  почвы (и некоторые другие).

Часто внешние переменные служат источниками систематических ошибок. Не всегда все эти переменные можно указать на данном этапе разработки методики, некоторые из них будут выявляться при выборе способа измерения других параметров. Например, при объемном определении расхода топлива потребуется измерять температуру воздуха или топлива.

Для построения расчетных зависимостей, предусмотренных п. 2 программы, требуется знать значения удельных давления  $p$  и сопротивления  $q$ , коэффициента трения  $f$  и некоторых других (линейных и угловых) параметров, определяющих диск и его положение в почве (например, толщину  $b$  и радиус  $r$  диска).

Таким образом, при выполнении п. 2 программы экспериментов необходимо контролировать  $a$ ,  $\lambda$ ;  $R_x$ ,  $R_z$ ;  $\rho_n$  и  $W$ ;  $p$ ,  $q$ ,  $f$ ;  $b$ ,  $r$ .

Далее при разработке методики экспериментов решаются вопросы об измерении отдельных величин. Для измерения некоторых разрабатываются специальные методики (например, для  $p$ ,  $q$ ,  $f$ ), для измерения других используются стандартные (для  $\rho_n$  и  $W$ ), методики измерения третьих ( $a$ ,  $\lambda$ ,  $R_x$ ,  $R_z$ ) разрабатываются совместно с учетом необходимости сокращения трудоемкости опытов.

### 3. Выбор и обоснование точности результата измерений

**Выбор точности результата.** При проведении исследований приходится задаваться необходимой точностью получаемого результата и, исходя из этого, планировать эксперимент. К сожалению, строгих правил установления этой точности нет. В ряде случаев сведения об этом можно найти в вышеупомянутых ГОСТах на испытания машин, отраслевых нормах и методиках. В большинстве из них точность измерения прямо не указана, а приводится методика измерения показателя или параметра, обеспечивающая приемлемую точность, которая далее определяется по результатам измерений и указывается в протоколе. «Приемлемость» этой точности измерения базируется на большом опыте отечественных испытателей и исследователей машин. Тем не менее шаблонно эти данные использовать нельзя.

Если исследователь сталкивается с нестандартной ситуацией, он вынужден «обосновывать» точность измерений, руководствуясь аналогиями, опытом, возможностями измерительной техники и здравым смыслом.

Точность результата должна быть целесообразной. При этом учитываются следующие факторы.

*Назначение результата.* Например, определяют предел прочности материала. Далее результат используют при расчетах конструкций, причем с учетом ряда коэффициентов запаса прочности, о которых известно, что  $k_i$ , например, равен 2...5 или 0,7...1,0. Предельная ошибка 2...5% при определении предела прочности допустима.

Исследуя зависимость качества обмолота от частоты вращения вала барабана, вряд ли требуется измерять частоту с предельной ошибкой меньше 3%, так как в практике частота вращения барабана устанавливается без прибора.

*Свойство объекта.* Почва по краю борозды вспучивается на 0,5...1,5 см. В замере глубины линейкой с точностью более 0,5 см нет смысла.

*Стоимость измерений.* В ряде случаев для обеспечения высокой точности требуются очень дорогие приборы и оборудование, большие затраты труда, а исследователь не располагает соответствующими возможностями.

При эксплуатационно-технологической оценке тракторов, например, допускаются следующие предельные

ошибки измерений: тягового усилия и момента двигателя 3%, частоты вращения вала двигателя 0,5%, вала отбора мощности и ведущих колес 1%, расхода топлива 1%, времени 0,2 с, температуры 2°C. При оценке сельхозмашин: хронометраж 5 с, объем выполненных работ в гектарах 1%, убранная продукция, перевезенный груз 0,5%, общий расход топлива 3% [47].

В случае косвенных измерений ошибка измерения отдельного параметра определяется исходя из общей ошибки результата, которая назначается в соответствии с изложенным выше.

Иногда приходится выполнять измерения с довольно высокой точностью. Остановимся на одном часто встречающемся случае. Определяется зависимость  $y=f(x)$ . При изменении  $x$  от  $x_{\min}$  до  $x_{\max}$  значение  $y$  изменяется на 10%. Какова должна быть допускаемая ошибка измерений  $y_i$ ? Для того чтобы «уловить» разницу и верить ей, предельная ошибка должна быть порядка 5% от прироста, или 0,5% от измеряемой величины.

В дополнение к этому следует сказать, что при отыскании зависимости  $y=f(x)$  путем задания значений  $x_i$  и измерений  $y_i$  следует обеспечить равноточность измерений  $y_i$  с целью упрощения обработки результатов. Вообще, при совместном использовании результатов измерений одной и той же величины, получаемых в разных опытах, следует стремиться к равноточности измерений (к равенству  $\sigma_{\bar{y}}$  при измерениях  $y$  в разных опытах).

В примере с диском для п. 2 программы, с учетом того, что в задачи исследования включена разработка методики расчета силовых параметров дисков-двигателей, а в программу опытов — определение сходимости (совпадения) расчетных и опытных зависимостей, требуется довольно высокая точность измерения всех параметров.

Решение вопроса можно начать с того, что величины удельных давления  $p$  и сопротивления  $q$  и частично коэффициента трения  $f$ , понятные с теоретических позиций, с практических — представляются весьма неопределенными, так как их очень трудно измерить. Их значения в большей степени зависят от метода их измерения. В аналитические выражения для расчета  $R_x$  и  $R_z$ , выведенные при ряде допущений, будут подставлены значения не  $p$ ,  $q$  и  $f$ , а значения каких-то других величин, допустим,  $p'$ ,  $q'$  и  $f'$ , с которыми они в сильной степени коррелированы, а может быть связаны функциональными зависимостями. Поэтому совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей маловероятно. Для практических расчетов придется искать поправочный коэффициент, учитывающий это несовпадение. С какой точностью получать его?

Так как при расчете машин используются разного рода «коэффициенты запаса», значения которых даются в виде интервала с границами, отличающимися друг от друга на 10% и более, можно принять предельную ошибку определения коэффициента порядка 5%. Допустим, что этот коэффициент является отношением результатов расчетов к результатам измерений, а измерить  $R_x$  и  $R_z$  в опыте можно с ошибками 1,5...2%. Учитывая выводы из формул сложения ошибок (с. 115, 133) можно принять допускаемую ошибку расчетных значений этих величин, равной 5%. Далее, используя правила вычисления ошибки косвенных измерений и учитывая возможности измерительной аппаратуры, находят ориентировочно допускаемые ошибки измерения остальных параметров ( $a$ ,  $\lambda$ ,  $q$ ,  $p$ ,  $f$ ,  $b$ ,  $r$ ).

Можно исходить из других предпосылок. Например из такой. При испытаниях машин их сопротивление измеряют с предельной ошибкой 3%. Из предварительных расчетов или опытов следует, что диски-двигатели уменьшают сопротивление плуга на 15...20%. Значит, при расчете сил предельная ошибка 5...10% вполне допустима.

Точность измерения твердости и влажности почвы может определяться методикой ГОСТа на испытания плугов.

В большинстве отчетов и диссертаций вопрос о допускаемой или целесообразной точности измерений оказывается опущенным. Авторы приводят лишь данные о точности измерений отдельных параметров после выбора приборов и их калибровки. Однако это не означает, что исследователь этот вопрос не решал и не использовал это решение при разработке последующих вопросов методики.

#### 4. Измеряемые параметры и их фиксация

**Объект исследования.** В качестве объекта как источника исходных данных при эксперименте могут использоваться серийные образцы машин конкретных марок, макеты, т. е. неотработанные, но работоспособные конструкции машин, установок, узлов и т. д. с заданными, интересующими исследователя, параметрами, физические или аналоговые модели. В исследованиях в области механизации сельского хозяйства обычно используют серийные машины (иногда с некоторыми переделками) и макеты. Объектами исследования могут быть и производственные процессы (уборки зерновых, корнеклубнеплодов и др.) и материалы (электролиты, защитные покрытия и т. п.).

Объект должен отвечать определенным требованиям. Основные из них: типичность, перспективность и соответствие материальной базе (см. с. 19).

В примере с дисками-двигателями в качестве объекта использован макет плуга с активными дисками в агрегате с трактором МТЗ-80. Такой пахотный агрегат не представляется ни типичным, ни перспективным, так как объем вспашки, выполняемой этими тракторами, очень мал и все время уменьшается. Но в данном случае как раз возможно исключение. Если намечаются лабораторные опыты, то необходима разработка и изготовление лабораторной установки.

**Способы измерения контролируемых параметров.** Следующим этапом разработки методики эксперимента является обоснование способов измерения контролируемых параметров и определение непосредственно (прямо) измеряемых величин. Решение этих вопросов тесно связано с выбором приборов и выполняется параллельно с ним. При этом рассматриваются возможные способы измерений контролируемых параметров, формулы для их расчета и с учетом уже решенных методических вопросов определяют прямо измеряемые величины.

Обратимся к примеру получения опытных зависимостей  $\{R_x, R_z\} = f(a, \lambda)$ .

Глубина хода диска  $a$  — непрерывная случайная величина. Она может быть измерена как разность между глубиной вспашки  $h$  и расстоянием от нижней кромки диска до плоскости лезвий лемехов  $h'$ . При замере  $h'$  линейкой плуг устанавливают на ровную площадку (деревянный щит). Стойка ножа может быть размечена для установки разных значений  $a$ . Глубину пахоты можно замерять вручную глубиномером или, используя специальное приспособление, записать на ленту осциллографа. Аналогично можно записать и величину  $a$ . Учитывая, что измерения  $a$  будут многократные, а для измерения  $R_x$  и  $R_z$  потребуется осциллограф, следует принять решение — записать на его ленте процессы изменения  $a$  или  $h$ . Точность измерения  $a$  и  $h$ , видимо, будет практически одинакова, поэтому придется учесть конструктивные соображения — простоту и возможность установки приспособлений.

Кинематический коэффициент  $\lambda = v_d/v_p$ . Окружная скорость диска  $v_d = \omega_d r = i \omega_p r$ , где  $\omega_d$  и  $\omega_p$  — угловые скорости диска и вала отбора мощности,  $i$  — передаточное отношение. Можно предположить, что значение  $i$  определяют с точностью на порядок выше, чем других параметров, и поэтому, выбирая для измерения  $\omega_d$  или  $\omega_p$ , следует учитывать конструктивные соображения. Величина  $\omega$  — непрерывная случайная, и требуется непрерывное или многократное ее измерение. Используя осциллограф, можно фиксировать значения  $\omega$ , но устройства, применяемые для этих целей, обычно громоздкие. Удобнее расчет:  $\omega = 2\pi n/t$ , где  $n$  — число оборотов вала за время опыта  $t$ . Каждый оборот (или часть его) фиксируется на ленте осциллографа в виде импульса. Время можно измерять вручную или по осциллограмме с отметками времени. Кроме этого, значение  $n$  в каждом опыте можно фиксировать отдельным импульсным счетчиком. Радиус диска  $r$  может быть многократно измерен линейкой.

Рабочую скорость  $v_p$  обычно определяют расчетом:  $v_p = S/t$ , где  $S$  — путь опыта. Путь может быть измерен рулеткой, может быть рассчитан:  $S = 2\pi r_k n_k$ , где  $r_k$  — радиус путеизмерительного колеса, делающего  $n_k$  оборотов за время опыта  $t$ . Величина  $n_k$  определяется аналогично  $n$ . Значение  $r_k$  можно найти с помощью линейки, но в принципе целесообразна калибровка «путемера» при рабочих скоростях, так как колесо катится по неровной поверхности, что обычно приводит к появлению не только случайной, но и систематической ошибки. Иногда (и при калибровке) вдоль прохода натягивают трос с шайбами, проход около которых фиксируется на ленте осциллографа в виде импульсов.

Значения  $R_x$  и  $R_z$ , представляющих собой непрерывные случайные величины, можно прямо фиксировать на осциллограмме, используя устройство для плоскостного динамометрирования рабочих органов и электрическое суммирование некоторых величин, но следует предусмотреть разгрузку этого устройства от крутящего момента. Значение  $R_x$  может быть найдено и как разность между сопротивлениями плуга (или установки) при работе с дисками-двигателями и без них. Аналогично можно определить  $R_z$ .

Однако не исключено, что точность такого измерения окажется низкой, так как относительная ошибка разности может намного превышать ошибки измерений составляющих ее величин.

Таким образом, можно прийти к выводу, что только для построения рассматриваемых опытных зависимостей при эксперименте будут измеряться следующие величины:  $h$ ,  $h'$ ,  $n$ ,  $t$ ,  $r$ ,  $n_k$ ,  $r_k$ ,  $R_x$ ,  $R_z$ . Для фиксации их (кроме  $h'$ ,  $r$ ) можно использовать осциллограф.

**Пределы изменения независимых параметров.** При планировании опытов исследователю приходится решать вопрос о пределах изменения значений избранных независимых параметров (в примере  $a$ ,  $\lambda$  и частично  $v_p$ ). При этом учитывается ряд соображений: назначение результата (для нормирования работ они одни, для исследования диска-двигателя — другие); типичность значений параметра (использование этих значений на практике); реальность пределов (возможность использования на практике); перспективы развития техники и производства (иначе результат быстро устареет); возможности объекта (возможность осуществления предельных значений параметра или предельные возможности исследуемого объекта), однако этот фактор не решающий — можно выбрать другой объект; результаты поисковых опытов (оптимум находится между какими-то значениями параметра — они могут быть известны), прочие соображения (безопасность, надежность и т. д.).

В примере с рассмотренными зависимостями поисковые опыты по выявлению влияния скорости движения на  $R_x$  и  $R_z$  целесообразно проводить при скоростях 7...15 км/ч. В этих пределах



находятся широко используемые сейчас скорости движения (7...9 км/ч), внедряемые (9...12) и перспективные (12...15 км/ч).

При радиусе диска  $r=250$  мм, выбранного из конструктивных соображений (возможности осуществления), максимум  $R_x$ , определенный по литературным данным и расчетом, соответствует глубине хода диска 0,5 г. Наибольшая возможная глубина 0,7 г, наименьшую можно принять 0,2 г. Зависимость  $R_x=f'(a)$  не имеет оптимума и поэтому в данном случае учитываться не будет.

Аналогично решается вопрос о выборе предельных значений  $\lambda=1...5$  (с учетом решения задач п. 3 программы опытов).

**Способы изменения независимых переменных** иногда бывают просты (переключение передач, регулировка машины), иногда требуют самостоятельных конструктивных решений (для изменения угла наклона линии тяги в агрегате с ДТ-75С и навесным плугом изготавливают специальные кронштейны на плуг и тяги навески) или замены отдельных деталей, узлов машин и т. д. Например, при исследовании влияния степени затупления лемехов на работу плуга приходится решать вопрос о способе их затупления, так как делается это обычно искусственно.

Исследование производственных процессов порой влечет за собой большую организационную работу. Например, если при исследовании процесса уборки зерновых одним из параметров служит расстояние перевозки зерна, то необходимо организовать выполнение экспериментов в хозяйстве с подходящими расстояниями от полей до тока.

В рассматриваемом в книге примере глубину хода диска и скорость движения изменяют просто — установкой рабочих органов по намеченным позициям и переключением передач. Параметр  $\lambda$  целесообразно изменять путем изменения окружной скорости диска, чтобы исключить влияние  $v_p$ . Для этого на экспериментальной установке должна быть предусмотрена коробка передач.

**Интервал изменения переменных.** Для получения зависимости  $y=f(x)$  необходимо измерить значения  $y$  при нескольких значениях  $x$ , находящихся в пределах  $x_{\min}...x_{\max}$ . Разность  $|x_i - x_{i-1}|$  называется интервалом изменения переменной. При определении значения этого интервала используют два основных критерия.

*Относительная точность данных на разных участках кривой.* Для механических систем данные, полученные при малой мощности, малом давлении обычно менее точные. В этом случае в области малых значений сле-

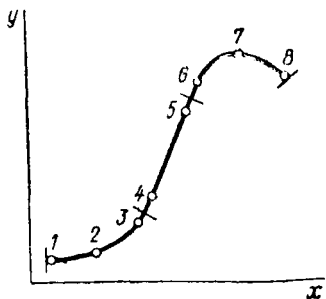


Рис. 16. К определению количества градаций независимой переменной.

дует сосредоточить больше точек и интервал взять меньше, учитывая, что с увеличением числа измерений в 4 раза ошибка уменьшается в 2 раза. Относится это и к другим системам.

*Характер кривой*, который обычно известен исследователю до опыта. Выбирая интервал для равноточной кривой, можно воспользоваться следующими правилами [18, 25]. При определении общего вида законо-

мерности сложную кривую рассматривают как комбинацию прямых и простых кривых (дуг), каждую прямую определяют двумя точками, простую кривую тремя, две точки получают для предельных значений. На кривой (рис. 16) один участок — прямой (2 точки), два — кривых ( $2 \times 3 = 6$ ) и две точки — предельные, итого 10 точек. Поскольку две крайние точки принадлежат простым кривым, можно обойтись восемью точками. Если требуется найти точные численные значения функции, то простую кривую находят по пяти точкам. Особое внимание уделяют «перегибу» кривой (ее максимуму или минимуму).

Так как положение перегибов кривой неизвестно до опыта, то точки располагают равномерно на оси абсцисс (т. е.  $x_i - x_{i-1} = \text{const}$ ), а во время опыта уточняют их положение (интервал может быть и неравномерным).

В большинстве случаев при выборе вида интервала (равномерный или нет) следует учитывать методы обработки данных. Некоторые простые приемы, например метода наименьших квадратов, требуют равномерности интервала. Многие исследователи именно такой и выбирают, но после определения объема работ вносят коррективы.

Интервал часто определяется характеристиками объекта.

Рассматривая влияние скорости движения на  $R_x$  и  $R_z$ , надо выбрать значения скоростей, соответствующие передачам трактора: это позволит установить практически одинаковые скорости при повторении опытов. Зависимость  $R_x = f(a)$ , имеющая вид кривой (рис. 16) без точек 1, 2, 3, может быть построена по семи

точкам, лежащим в пределах от 4 до 16 см с равномерным интервалом (2 см). При этом в области  $R_{\text{max}}$  могут быть дополнительные точки, но их можно и опустить, так как интервал взят достаточно малым.

**Способы фиксации параметров.** Немаловажное значение при решении вопроса об измеряемых параметрах имеет выбор способов фиксации параметров или выходных устройств информационно-измерительной системы (ИИС) с обязательным учетом способов обработки результатов измерений.

Выходные устройства служат для представления результата измерения в виде, удобном для дальнейшего использования. Их можно разделить на две большие группы: индикаторные, показания которых оператор списывает вручную для дальнейшей обработки, и регистрирующие, показатели которых регистрируются (записываются) на бумажный, магнитный или другой носитель. Регистрирующие удобны тем, что освобождают оператора и обеспечивают документальную объективную запись. Индикаторные в ряде случаев проще и позволяют быстрее определить результаты измерения.

Выходные устройства могут быть, как и ИИС в целом, дискретными (т. е. цифровыми) и аналоговыми (с непрерывным указанием результатов измерения). И те и другие бывают индикаторными (электронный осциллограф, счетчик оборотов или импульсов) и регистрирующими (с выдачей осциллограммы или ряда чисел после цифропечатающего устройства).

Индикаторные (указывающие) приборы целесообразно использовать в исследованиях и испытаниях при экспресс-проверках (типа диагностирования), при однократных измерениях, при многократных измерениях с целью определения среднего значения какой-либо величины (глубины обработки, силы тяги), при многократных, но редких измерениях мало меняющихся величин (температура воздуха, давление в шинах и т. д.). Съем показаний в этих случаях редкий и не требует больших затрат труда, а результат получается быстрый и чаще всего дешевый.

Поскольку в исследованиях требуется объективная документальная запись многократных измерений, в основном используют регистрирующие устройства с учетом трудоемкости обработки — дискретные, а из-за доступности осциллографов — непрерывные.

*Осциллограф* дает непрерывную запись процессов (до 20 параметров)—наглядную и привычную. Но велик разрыв от измерения до получения результата, так как требуется проявлять фотобумагу, да и последующая обработка затруднена. Правда, в последние годы появились самопроявляющиеся бумаги (при ультрафиолетовом луче), бумаги с цветной записью, облегчающие анализ записи и ее обработку.

*Магнитограф* (также многоканальный) используется чаще всего вместе с ЭВМ. Прибор сложен. Большое неудобство — отсутствие возможности визуального слежения за ходом опыта.

*Цифропечатающие устройства*, в которых выдается на печать обработанный результат измерений, например значения точек кривых тяговой характеристики, очень удобны. Запись на перфоленты и перфокарты используется в крупных исследовательских учреждениях для быстрой обработки результатов измерений на ЭВМ.

В ряде случаев целесообразно использовать совместно регистрирующие и индикаторные приборы. Например, при исследовании плуга условия его работы (почвенные) очень изменчивы, что приводит к большому разбросу данных, а следовательно, и к уменьшению их точности. Наиболее эффективный путь повышения точности — запись сопротивления на осциллографе с привязкой к пути, выбор участков с приблизительно равным и равномерно меняющимся сопротивлением, а затем проведение измерений с индикаторным выходным устройством и периодическими контрольными проходами с осциллографом.

*Киносъёмка*, обычно скоростная, занимает особое место в исследованиях. Она используется чаще всего в тех случаях, когда необходимо изучить явление в развитии, а измерить параметры, характеризующие это развитие, не удастся или это очень сложно другим путем. Например, исследуется характер и скорость движения частиц почвы при вспашке, хлебной массы в молотилке, клубня в картофелесажалке и т. п. В материал добавляют меченые (обычно окрашенные) частицы, проводят скоростную киносъёмку, а затем пленку с известной частотой кадров и масштабом покадрово обрабатывают и определяют интересные показатели. Обработка очень трудоемкая, но другим путем результат получить нельзя.

Скоростная киносъемка (или замедленная—фотопулемет) могут использоваться при изучении случайных траекторий, таких, как траектория трактора или прицепа при движении, когда вместо измерения ускорений, двойное интегрирование которых дает отклонение от прямой, или следов на почве фиксируется покадрово положение машины, а в лаборатории с меньшими затратами труда и с большей точностью выполняется обработка.

Широко используется и обычная киносъемка с фотографией, однако цель их использования чаще всего иллюстративная.

Возвратимся к примеру с зависимостями  $R_x$  и  $R_z$  от  $a$  и  $\lambda$ .

Малочисленные измерения  $h'$  и  $r$  следует выполнить индикаторным прибором (линейкой). Случайные величины  $h$ ,  $R_x$  и  $R_z$  регистрируют на ленте осциллографа, магнитографа или, так как не исследуется динамика процессов, на цифropечатающем устройстве с выдачей среднего значения. При выборе участка для опытов целесообразно эти величины фиксировать на ленте осциллографа. Это поможет подобрать приборы с подходящими метрологическими и динамическими характеристиками, рассчитать точность измерений. Регистрация  $n$ ,  $t$  и  $n_k$  возможна на тех же носителях, что и регистрация  $R_x$  и  $R_z$ . При использовании осциллографа фиксация  $n$  и  $n_k$  возможна и удобна с помощью импульсных счетчиков, исключающих несколько трудоемкий их подсчет по осциллографическим записям, но требующих последующей их фиксации оператором. При калибровке «путемера» большая точность получится при осциллографической записи.

**Способы обработки первичных материалов.** При определении измеряемых параметров и способов их фиксации обязательно учитывают способы обработки первичных материалов экспериментов—журналов фиксации данных, осциллограмм, магнитограмм, лент цифropечатающих устройств, лент киносъемки и др. Фиксируемые материалы можно обрабатывать разными способами, в том числе вручную, с частичной и полной механизацией или автоматизацией.

*На специальных приспособлениях или ЭВМ* обрабатывают магнитограммы.

*Методами математической статистики* с определением среднего значения показателя и стандарта, а в ряде случаев с предварительным определением вида закона распределения (если это предусмотрено программой) обрабатывают числовые результаты многократных измерений (ряды измерений или статистические ряды—записи в журналах, выход на цифropечатающие уст-

ройства). Формулы для расчета среднего значения показателя и стандарта даны в разделе точности измерений. Расчет выполняется вручную или на ЭВМ с предварительной фиксацией на перфоленту или перфокарту результатов измерений.

Осциллограммы обрабатывают разными методами, цель которых получить числовой ряд или его характеристики.

*Методом планиметрирования* — замером планиметром площади под кривой с делением ее на время опыта получают среднее значение ординат процесса; метод — ручной, используют в случаях, когда не требуется значение стандарта измерения.

*Методом ординат* — замером ординат через интервал времени с последующей обработкой полученного ряда измерений получают среднюю, стандарт и другие числовые характеристики процесса. Метод — ручной, снятие ординат, последующая обработка аналогичны обработке числовых результатов многократных измерений.

*Методами квантования по уровню:* методом пик, амплитудной классификации, пересечения уровней получают распределение амплитуд по классовым промежуткам (см. с. 185). На рисунке 17 изображена обработка осциллограммы методом пересечения уровней.  $N$  — номер классового промежутка с высотой ординат: 1 — 20... 25 мм; 2 — 25...30 мм; 3 — 30...35 мм и т. д. Линии проводят на уровне середины классового промежутка: 22,5 мм, 27,5 мм и т. д.;  $n_i$  — число ординат, попавших в классовый промежуток (число пересечений кривой с линией номера классового промежутка). Горизонтальные линии обычно не наносят на осциллограммах: используется прозрачный шаблон с этими линиями, который передвигают вдоль ленты. Ряд

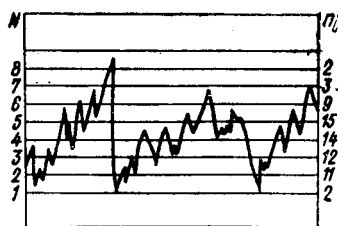


Рис. 17. Обработка осциллограммы методом пересечения уровней.

$n_i$  обрабатывают методами математической статистики.

Для обработки осциллограмм используют электрические классификаторы, дающие распределение ординат по классам, например прибор обработки бумажных динамограмм (12 классов) марки ПОБД-12. С классификатора через кодирую-

щее устройство возможен выход на ЭВМ. Разбивка на классы и замер ординат ведутся с учетом точности считывания (замера ординат) на порядок (т. е. в 10 раз) выше точности измерения параметра.

Обработка осциллограмм при построении корреляционных функций и спектральных плотностей выполняется вручную или с помощью корреляторов и ЭВМ.

При анализе периодических процессов используют спектральные анализаторы [36].

Для кодирования осциллографических записей при вводе данных в ЭВМ применяют механические, электрические [например, 38], фотоэлектрические [9] устройства. Последние связаны с так называемым методом «теневого» графика, требующего специальной обработки осциллограмм.

Кинопленку скоростной съемки обрабатывают путем последовательного проектирования отдельных кадров на экран с координатной сеткой и проведения соответствующих измерений. Для этих целей выпускается специальная установка. Обработка очень трудоемкая.

Данные о некоторых приборах для обработки первичных материалов приведены в литературе [38, 69 и др.].

## 5. Выбор приборов для измерений

Решение всех предыдущих вопросов методики неразрывно связано с выбором приборов. Исследователь всегда должен задавать себе вопрос, почему именно этот прибор, датчик, преобразователь и т. д. применяется, и всегда отвечать на него.

**Исходные данные для выбора приборов.** При выборе приборов используется ряд исходных данных:

- перечень всех показателей, измеряемых непосредственно (прямо);

- необходимая точность результата измерения;

- количество одновременно измеряемых параметров;

- диапазон изменения измеряемых показателей;

- предполагаемая динамическая характеристика фиксируемых процессов (главным образом диапазон частот процесса);

- необходимость синхронной записи нескольких процессов;

необходимый вид и характер информации (непрерывная запись процесса, среднее значение показателя, характеристики изменчивости процесса, характеристики взаимосвязи показателей и т. д.);

необходимость быстрого получения результата измерения в процессе или после проведения измерения;

условия размещения приборов на объекте (по присоединяемости, габаритам, массе, технике безопасности и т. д.);

условия работы приборов при опытах (вибрация, температура, запыленность и т. д.);

наглядность информации;

документальность информации;

материальная база (наличие измерительной и вычислительной техники, операторов, обслуживающего персонала и т. д.);

объем работ при проведении экспериментов и при обработке результатов.

Особое место среди этих исходных данных занимает относительная подвижность отдельных деталей. При измерении, например, крутящего момента на валу или усилий, приложенных к пальцу гусеницы трактора, требуется связать электрической цепью датчики, расположенные на подвижных частях, с другими элементами ИИС. Необходимы токосъемники. Но они обычно или мало надежны или вносят ошибку. Нельзя не согласиться [18], что лучше обеспечить надежность ИИС на один опыт, чем при малой ее надежности запланировать несколько опытов. В частности, при измерении усилий на пальце гусеницы можно допустить закрутку кабеля вместо использования токосъемника. К закрутке проводов приходится прибегать и при отсутствии места для установки токосъемников, обычно относительно громоздких. Некоторые примеры на эту тему приведены в литературе [18].

Определенную помощь в выборе приборов оказывает знание их классификации [38, 47, 69]. Классифицируют по назначению целые наборы или комплекты: приборы для тормозных испытаний тракторных двигателей, для тяговых испытаний тракторов и др. Приборы классифицируют по измеряемому параметру: динамометры; влагомеры и т. п.; по группам датчиков и передач: механические, пневмогидравлические, электрические; по функциям преобразователей: усилители, интеграторы,



корреляторы, классификаторы и др.; по выходным устройствам: индикаторные и регистрирующие; по классу точности; по транспортабельности: стационарные и портативные; а также по некоторым другим признакам.

**Характеристики приборов.** При выборе приборов и ИИС в целом учитывается ряд их показателей:

показатели метрологической и динамической характеристик прибора (см. гл. IV, п. 7);

масса прибора, особенно важна для портативных приборов и приборов, которые перемещаются вместе с отдельными деталями механизмов и могут исказить действительные выходные показатели;

габариты прибора, часто определяющие возможность его использования;

линейность прибора (см. с. 126), значительно облегчающая его калибровку и обработку результатов измерений;

количество одновременно измеряемых параметров;

дистанционность измерения и управления;

способы преобразования информации (перечень операций функционального преобразователя: усиление, кодирование, суммирование, интегрирование и т. д.);

форма и характер представления результатов измерения (индикаторные и регистрирующие, аналоговые или цифровые и т. д.);

удобство монтажа и демонтажа;

надежность прибора; она влияет на точность (устойчивость) измерений, на продолжительность опытов, затраты труда и средств; отказ прибора может привести к повторению уже проделанной работы, так как за время перерыва для устранения поломки может измениться погода, а значит, и условия опытов, что приведет к несопоставимости результатов из-за появления систематической ошибки;

простота конструкции прибора; она часто определяет его надежность — простой прибор надежнее, его легче освоить, обслужить и отремонтировать;

ток питания (для электрических приборов); с постоянным током работать удобнее, так как легко балансировать мосты, стабилизировать напряжение, цепь нечувствительна к промежуточным емкостям тензодатчиков, проводов и т. д., а также к промышленным электрическим шумам (помехам), экранировка проводов не требуется;

универсальность прибора, особенно при его приобретении.

**Датчик**, или первичный преобразователь, тоже своего рода прибор, поэтому и ему присущи показатели метрологической и динамической характеристик более сложных приборов, такие, как вариация или устойчивость показаний (очень неустойчив емкостной датчик); порог чувствительности (обычно очень маленький), собственное потребление энергии; частотные характеристики, а также масса, габариты, линейность, надежность и простота, ток питания, универсальность, удобство монтажа.

По физическим признакам датчики делятся на механические, пневмогидравлические и электрические. Датчики первых двух групп не отвечают основным тенденциям развития ИИС: они просты, но требуют высокой точности изготовления, из-за больших масс очень инерционны, дают большое запаздывание по фазе, не позволяют измерять быстроменяющиеся процессы, почти не управляются дистанционно. Поэтому в исследованиях их теперь используют редко: для отдельных статических измерений, для калибровки, так как не имеют погрешностей электрических цепей, при нормировании работ (из-за простоты, надежности, а также отсутствия потребности в измерении многих параметров).

Наибольшее применение получили электрические датчики: реостатные и реохордные, тензорезисторные (проволочные, фольговые, полупроводниковые), индуктивные, индукционные, магнитоупорные, емкостные, фотоэлектрические, радиоактивные и некоторые другие. Их применяют при замере перемещений, сил, моментов, давлений, частоты вращения, температуры, ускорений, концентрации компонента и т. д. Практически можно подобрать датчик для замера большинства интересующих нас параметров.

Конструкции и схемы приборов и датчиков, их характеристики и способы использования, а также заводы-изготовители указаны в соответствующей литературе [22, 38, 47, 69, 81] и библиографии (списках литературы) к ним.

**Функциональные преобразователи.** К основным математическим операциям, выполняемым приборами, используемыми при исследованиях и испытаниях в области механизации сельского хозяйства, можно отнести:

осреднение — определение среднего значения ряда дискретных или непрерывных измерений (средней глубины обработки, сопротивления орудия и т. д.);

суммирование и умножение — определение, к примеру, тягового сопротивления навесного плуга суммированием усилий в тягах, определение мощности двигателя умножением момента на частоту вращения и т. п.;

дифференцирование и интегрирование — определение скорости (для угловых — тахометры), определение среднего значения крутящего момента, усилия и т. д.;

амплитудный статический анализ — распределение ординат по классам для выявления изменчивости процесса, характеризуемой стандартом;

корреляционный анализ — определение взаимной связи процессов.

Устройства, выполняющие эти операции, включены в общую ИИС или используются отдельно при обработке записи процесса на осциллограмме: коррелятор, классификатор и др., а также являются частью отдельного прибора, например тахометра.

Преобразователи могут быть механическими (интегратор работомера), электромеханическими (классификатор), электрическими и электронными.

Устройство и работа преобразователей описаны в литературе [38, 69] и в работах по испытаниям машин, теории машин и механизмов.

Большой интерес представляют подобные преобразователи, включаемые в ИИС между измерителем и ЭВМ. Это разного рода кодирующие устройства, позволяющие вводить данные измерений для обработки в машину [например, 38].

Существуют преобразователи механических перемещений (у механических приборов) и электрических сигналов в цифровой код.

Простейшее устройство для кодирования — включенный в информационно-измерительную систему классификатор с соответствующей приставкой.

Цель использования всех преобразователей: сокращение времени от измерения до получения результата. Это позволяет анализировать результаты в ходе опытов, вносить изменения в планы и методику и за счет этого сокращать время опыта с повышением точности результата, сокращать трудоемкость обработки результа-

тов измерений (все эти преобразователи есть вычислительные машины той или иной степени сложности).

Для каждого конкретного исследования можно составить несколько ИИС с указанием конкретных марок приборов и датчиков и выбрать из них наиболее подходящую по предлагаемым исходным данным. К сожалению, часто не удается подобрать по той или иной причине ни одной ИИС, включающей все без исключения элементы. Приходится разрывать схему, вводить ручные замеры и обработку, что усложняет, затягивает, удорожает работу.

Рекомендации по выбору датчиков и приборов и относящиеся к этому расчеты изложены в литературе, указанной на странице 160.

При выборе приборов для измерения параметров, связанных с построенным опытным зависимостями  $\{R_x, R_z\} = f(a, \lambda)$ , в целях упрощения последующего изложения принято, допустим, такое решение:  $R_x, R_z, a$  фиксируются непрерывно на ленте осциллографа К20-21 с последующей обработкой кривых на ПОБД-12. Там же фиксируются  $n$  и  $n_k$  (с помощью индукционных датчиков) и время опыта. При выборе осциллографа учтены возможности записи процессов с достаточной высотой ординат без усиления и установки подходящей скорости протяжки ленты, зависящей от частоты колебаний фиксируемых процессов. В устройстве для фиксации глубины использован реостатный датчик. Радиус диска измеряют линейкой, радиус измерительного колеса определяют при калибровке, используя трос с шайбами, установленными на нем через 0,5 м.

Конкретные марки и параметры датчиков, гальванометров осциллографа и вспомогательных устройств находят расчетным путем или подбором, исходя из опыта исследователя и его помощников, а также на основе литературных данных.

## 6. Планирование опытов

После рассмотренных этапов методики известен полный перечень фиксируемых в опытах параметров. На основании этого перечня исследователь представляет формулы для расчета всех величин, получаемых из эксперимента и используемых в исследовании для решения поставленных в нем задач.

В примере с опытными зависимостями  $\{R_x, R_z\} = f(a, \lambda)$  расчетные формулы имеют вид

$$\lambda = \frac{n r}{n_k r_k}, \quad v_p = \frac{2 \pi n_k r_k}{t}.$$

Значения  $\bar{R}_x$ ,  $\bar{R}_z$ ,  $\bar{a}$  и их стандарты  $\sigma_{R_x}$ ,  $\sigma_{R_z}$ ,  $\sigma_a$  рассчитывают по формуле (IV.4).

Здесь же решают вопрос о принципиальном подходе (об общих формулах) исключения промахов и определения ошибок измерений: о сложении систематической и случайных ошибок, о расчете ошибок косвенных измерений и т. д. Эти положения рассмотрены в главе о точности измерений.

Решение этих вопросов позволяет систематизировать измерения, проверить полноту перечня измеряемых параметров, разработать черновики журналов регистрации опытных данных, предварительно распределить работы между исполнителями.

**Расчет количества опытов.** При наличии случайной ошибки измерения проводятся многократно с целью ее уменьшения. Общее количество измерений одной величины (например,  $R_x$  или  $R_z$ ), для получения одной точки на графике рассчитывают по формуле (IV.11), определяют по таблице 3 или находят при проведении опытов методом последовательного приближения. Следует учитывать, что стандарт  $\sigma_x$  в (IV.11) представляет собой суммарную ошибку разных источников, а значение допускаемой ошибки  $[\Delta \bar{r}_H]$  определяют, исходя из анализа общих ошибок измерения искомых выходных показателей (см. гл. IV, п. 10, и 11; гл. V, п. 3).

Если полученное расчетом или по таблице 3 необходимое число измерений оказывается очень большим (порядка тысячи и десятков тысяч) и практически невыполнимым, необходимо в корне менять методику измерения.

С целью уменьшения или исключения систематических ошибок, а попутно и случайных, каждый опыт повторяют  $l$  раз, т. е. для одних и тех же условий опыта (одинаковых почвенных условий и значений,  $a$ ,  $\lambda$  и  $v_p$ ) необходимо получить несколько отдельных совокупностей фиксированных значений величин и отметок.

**Повторность** (повторение) опыта — проведение измерений при тех же условиях, но с новой настройкой. Повторности одного опыта никогда не проводятся подряд. В каждой повторности время (путь) опыта определяют с учетом (IV.13; IV.13а), если фиксируют случайные процессы (глубина обработки) и последовательности (время наполнения бункера зерном) или находят их параметры.

Вопрос о количестве повторностей решается исходя из заданной точности измерений. При однократных измерениях в опыте число их равно рассчитанному числу измерений (в нашем примере в каждом опыте однократно измеряется  $\lambda$  и  $v_p$ ). Если в каждом опыте можно провести  $k$  измерений, например  $a$ ,  $R_x$  или  $R_z$ , а всего в соответствии с (IV.11) требуется  $n_0$ , то повторность опыта

$$l = n_0/k. \quad (V.1)$$

При синхронной фиксации параметров время опыта, число измерений и повторностей определяют по параметру, соответствующему наибольшему их значениям. Но во всех случаях *число повторностей должно быть не менее трех*. Проводя опыты на полях с уклонами, удобно использовать четное число повторностей.

Расчеты по обеспечению точности опытов заканчиваются предварительным расчетом ошибок всех измерений при использовании выбранных приборов, числа измерений, времени опыта и т. д. Часто возникает вопрос о том, где найти значения измеряемых величин и их стандартов  $\sigma$ , если исследователь еще не проводил опыты. Их можно найти в литературе, по данным поисковых или предварительных опытов или первых основных.

В примере с дисками требуется измерить  $R_x$  с предельной ошибкой  $[\delta \bar{R}_{11m}] = 2\%$ . Допустим, ориентировочно известно:  $R_x = 2000$  Н,  $\sigma \bar{R} = 100$  Н, коэффициенты корреляционной функции  $\alpha = 0,5$  1/м,  $\beta = 0,7$  1/м. Предельная ошибка калибровки  $\Delta_0 = 60$  Н. Так как  $3\sigma_R \gg \Delta_0$ , то при расчете ошибки  $\Delta_{R\Sigma}$  по (IV.15) величиной  $\Delta_0$  можно пренебречь (см. с. 115), так же как и ошибкой считывания ординат, и в формулы IV.11 и IV.13а подставлять значения  $\sigma_R$ . При  $[\delta \bar{R}_{11m}] = 2\%$  значение  $[\sigma \bar{R}] = 2000 \cdot 0,02/3 = 13$  Н. Тогда по (IV.13а)  $T_R \approx 80$  м. Чтобы при обработке не увеличить существенно ошибку, полученную вследствие ограниченности времени фиксации  $R_x$ , в (IV.11) следует подставить  $[\sigma \bar{x}] = [\sigma \bar{R}]/(3 \dots 5) = 5$  Н. Тогда  $n_0 = 400$  или при  $l = 3$  по 135 ординат в каждой повторности. Значения  $T_R$  и  $n_0$  взаимосвязаны, так как, увеличив  $T_R$ , можно уменьшить  $n_0$ , и наоборот. Иногда  $T_R$  корректируется в большую сторону с учетом удобства обработки (например, удобно на осциллограмме измерять ординаты, соответствующие отметкам времени).

Планирование, учет и контроль работ при проведении опытов и обработке упрощается делением опытов на серии.

*Серия опытов* — это обычно группа опытов, в которых изменяется один параметр. Например, одна серия опытов — опыты при  $\lambda = \lambda_1$ ;  $v_p = v_{p1}$  и изменении  $a$  от  $a_{\min}$  до  $a_{\max}$  (в серии 7 опытов), другая — при  $\lambda = \lambda_1$ ;  $v_p = v_{p2}$  и изменении  $a$  от  $a_{\min}$  до  $a_{\max}$  и т. д. В серии, как правило, легко меняется (с малыми затратами времени) избранный параметр, а по результатам серии опытов обычно можно построить зависимость.

*Количество опытов* в исследовании по схеме однофакторного эксперимента зависит от числа изучаемых факторов  $z$  (в примере их три:  $a$ ,  $\lambda$  и  $v_p$ ), от числа градаций изменения каждого фактора  $p_i$  (допустим,  $p_a = 7$ ;  $p_\lambda = 4$ ;  $p_v = 3$ ) и от повторности опытов  $l$  (допустим,  $l = 3$ ). Общее количество опытов ориентировочно при одинаковой повторности можно найти так:

$$N_o = \prod_i p_i l. \quad (V.2)$$

Для примера  $N_o = p_a p_\lambda p_v l = 7 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3 = 252$ . Это очень много даже для всей программы эксперимента. К тому же следует учитывать необходимость проведения дополнительных опытов, повторностей или серий опытов (увеличивать  $N_o$  на 10...15%).

Большой объем работ иногда заставляет изменить первоначальный план исследования. Основное требование к количеству опытов — полнота информации, обеспечивающая заданную точность результатов. Есть минимально необходимое количество опытов. Если оно невыполнимо, следует или сузить исследование — уменьшить количество факторов, или попытаться выполнить многофакторный эксперимент по другой схеме — факторной [78, с. 100, 185]. Основные особенности одной такой схемы указаны в главе III. При факторной схеме («факторном плане») точность измерения величины определяется не только числом измерений в отдельном опыте и его повторностью, но и общим количеством опытов. Поэтому общее количество измерений может быть уменьшено в несколько раз.

Большую роль в сокращении объема эксперимента играют теоретические разработки, позволяющие выявить вид зависимостей и характерные точки.

При опытах с дисками (по п. 2 программы) серия поисковых опытов для выявления влияния на  $R_x$  и  $R_z$  скорости движения  $v_p$  была проведена лишь при оптимальных (или близких к ним)

значениях  $a$  и  $\lambda$  —  $a_{\text{опт}}$  и  $\lambda_{\text{опт}}$ ; серия опытов с изменением  $a$  при  $v_p = v_{p1}$  и  $\lambda = \lambda_{\text{опт}}$ , а серия с изменением  $\lambda$  при  $v_p = v_{p1}$  и  $a \approx a_{\text{опт}}$ . Достаточная сходимость опытных и расчетных зависимостей при этом позволила далее проверить теоретические положения при проведении небольшого количества опытов со случайными (разыгранными по жребью) наборами значений параметров.

Расчетные формулы и примеры по определению необходимого количества опытов и измерений при определении средних значений величин, стандартов, законов распределения случайных величин, при проверке статистических гипотез можно найти в работах [19, 33], при планировании опытов по определению надежности изделий [66, 70] и в другой литературе по теории вероятностей, математической статистике и надежности разных устройств.

**Порядок проведения опытов.** Порядок (план) проведения опытов может быть двух видов: рандомизированный (случайный) и последовательный.

Цель рандомизации — устранение систематической ошибки (см. с. 130).

*Рандомизированный план* наиболее приемлем в исследованиях по механизации сельского хозяйства, так как условия опытов непрерывно меняются, а учесть это не всегда можно [51 и др.].

*Последовательный план* целесообразен лишь в отдельных случаях.

При невоспроизводимых экспериментах (например, при испытании материалов), нельзя прикладывать нагрузку в случайном порядке — образец деформируется при большой нагрузке, а при малой, приложенной после, результат искажается. Строго говоря, все эксперименты невоспроизводимы, так как в первоначальное состояние объект и прибор не возвращаются, но часто изменения малы, их нельзя обнаружить, и ими пренебрегают. В области исследований по механизации сельского хозяйства невоспроизводимость эксперимента или условная воспроизводимость является причиной многих ошибок и непроверяемости результатов исследований.

В экспериментах, когда сама последовательность условий является определенным параметром, часто требуется последовательный план. Например, коэффициент трения жидкости внутри трубы зависит от вида потока (ламинарный или турбулентный). Если плавно повышать число Рейнольдса, то ламинарный поток со-



хранится в области перехода к турбулентному, что отразится на значении коэффициента трения.

Когда долго или сложно выполняется переналадка на другие условия, рандомизированный план неудобен. При работе с зерносушилкой, например, последовательный ее нагрев сокращает сроки работы, так как снижение температуры при случайном плане занимает много больше времени, чем нагрев.

При составлении рандомизированных планов часто используют так называемые латинский и греколатинский квадраты [72 и др.]. Например, определяют оптимальную скорость резания новым резцом [78]. Выбрано случайно четверо рабочих: *A*, *B*, *C* и *D*; четыре скорости резания: 1, 2, 3 и 4; каждый рабочий будет работать по одному дню с одной скоростью. В каком порядке? Можно в порядке постепенного повышения скорости, но энтузиазм, интерес первых дней могут измениться к последнему дню, может появиться натренированность и т. д. Целесообразен план работы со скоростями, указанными в таблице 6.

Таблица 6. План опытов для определения оптимальной скорости резания (латинский квадрат)

| Рабочий  | Скорость в дни работы |       |         |         |
|----------|-----------------------|-------|---------|---------|
|          | вторник               | среда | четверг | пятница |
| <i>A</i> | 1                     | 2     | 3       | 4       |
| <i>B</i> | 3                     | 4     | 1       | 2       |
| <i>C</i> | 2                     | 1     | 4       | 3       |
| <i>D</i> | 4                     | 3     | 2       | 1       |

В примере с дисками (п. 2 программы) с учетом необходимой точности измерений лучше использовать рандомизированный план.

**Планирование экспериментов** включает в себя определение количества опытов, порядка их проведения, расчет продолжительности опытов и составление календарного графика их выполнения, расчеты по материально-техническому обеспечению.

В расчетах учитывают время на подготовку опытов, которая часто длительнее, чем их проведение. Нужно время на приобретение и подготовку приборов, объекта, материалов. Много времени требуют организационные

вопросы. Учитывается время на проявление осциллограмм, полевую обработку опытов, переналадку объекта на новые условия, перерывы из-за непогоды и поломок, возможные изменения в методике.

Календарные планы составляются так, чтобы каждая серия проводилась в предельно сжатый срок, точно ограниченный, чтобы дополнительные факторы мало менялись и результаты опытов были бы сопоставимы. Если сроки растягиваются, нужно продумать пути их сокращения.

Чаше всего при заданном объеме работ выход один — проведение под одним руководством одновременно опытов нескольких серий, но для этого нужно удвоить-утроить количество объектов, приборов, людей.

При планировании опытов рассчитывают потребность в оборудовании, площадях, материалах. Определяют необходимое количество приборов, площади в лаборатории и в поле, запасные части, количество топливо-смазочных материалов, фотоматериалов, вешек и т. д. Исследователь обязательно составляет подробнейший список всего необходимого для опытов, начиная от оборудования до карандашей (с указанием их цветов и количества).

При планировании опытов обязательно выполняется расчет потребности в людях и определяются их квалификация и обязанности.

## **7. Подготовка и проведение опытов**

**Подготовка** к проведению опытов ведется по разным, но одинаково важным направлениям.

*Материально-техническая подготовка* — приобретение, конструирование и изготовление оборудования; приобретение материалов, решение вопросов о площадях для проведения опытов, лабораториях, ЭВМ, привлекаемых машинах, заправке машин в других организациях и т. д.

*Организационная подготовка* — уточнение состава привлекаемых людей, расстановка их, согласование отпусков и сроков работ, оплата, подготовка жилищно-бытовых условий при проведении работ на выезде, решение вопроса о транспорте и т. д.

*Самоподготовка* — изучение приборов, условий опытов, методов измерений и обработки их результатов и т. д.

Подготовка участников сводится к их инструктажу и тренировке для работы с приборами и объектами.

**Разработка форм регистрации данных.** Для регистрации данных исследователь разрабатывает журнал с формами и таблицами (форма 1), представляющими собой бланки, которые заполняют при проведении опытов. Это ускоряет запись, а главное, облегчает контроль за ходом опытов и дальнейшую сводку данных (по данным двух-трех граф можно заметить зависимость).

17.9.1.0.1

### Форма 1

#### Влияние привода диска на производительность агрегата (V передача)

Агрегат МТЗ-80+ПН-3-35(М):

а) поле № 3, длина гона  $L=890$  м, уклон  $i=0,01$ , твердость почвы  $k=...$ , влажность  $W=...$ ;

б) установленные параметры: глубина пахоты  $a=0,22$  м, глубина хода диска  $h=0,12$  м, кинематический коэффициент  $\lambda=2,1$ ;

в) обозначения: + диск с приводом, — без привода,  $t$  — время опыта,  $v_p$  — рабочая скорость,  $a$  и  $b_p$  — глубина пахоты и рабочая ширина захвата,  $\omega_{TF}$  и  $\omega_{TQ}$  — производительность  $Lb_p/t$  и  $Lb_p a/t$ .

Исполнители: графы 1...4 — Иванов А. П.

графы 5...9 — Петров И. К.

| Номер опыта | Повторность | Привод диска | $t$ , с | $v_p$ , м/с | $a$ , м | $b_p$ , м | $\omega_{TF}$ , м <sup>2</sup> /с | $\omega_{TQ}$ , м <sup>3</sup> /с |
|-------------|-------------|--------------|---------|-------------|---------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1           | 2           | 3            | 4       | 5           | 6       | 7         | 8                                 | 9                                 |
| 1           | 1           | +            | 347     | 2,57        | 0,223   | 1,09      | 2,80                              | 0,624                             |
| 2           | 1           | —            |         |             |         |           |                                   |                                   |
| 1           | 2           | +            |         |             |         |           |                                   |                                   |
| 2           | 2           | —            |         |             |         |           |                                   |                                   |
| ...         | .....       | ...          | ...     | ...         | ..      | ...       | ...                               | ...                               |
| 2           | 4           | —            |         |             |         |           |                                   |                                   |

Примечания. 1. Примечания по каждому опыту можно поместить под таблицей. 2. Сведения пп. а, б, в могут быть оформлены отдельным документом. 3. В последующих сериях и других документах сведения пп. а, б, в можно указать ссылкой на документ 17.9.1.0.1. 4. Графы 6 и 7 заполняют по данным других документов.

Журнал составляют с учетом плана и методики так, чтобы по нему было видно, что и в каком порядке делать. Измерениям одной серии опытов отводится не ме-

нее одной страницы. Необходимо составить перечень всех форм.

Каждую форму составляют с учетом удобства последующей обработки данных. В каждой форме предусмотрено указание даты, участка, номеров проб почвы и других замеров, выполненных отдельно (температура, осциллограмма), состава агрегата, исполнителя. Обязательная графа «Примечания», где фиксируют замечания по каждому опыту или измерению. Если отметок много, то отводят специальные страницы. Все графы нумеруют. Если участников опытов несколько, то индивидуальный журнал (записная книжка) должен быть у каждого. Сразу после обработки результата данные из них заносят в общий журнал. Формы таких журналов также разрабатывают заранее — они являются частями форм общего журнала. В формах обоих журналов указывают одинаковые данные, даты и т. д., обеспечивающие легкость проверки.

*Разработка системы нумерации или шифровки материалов* (осциллограмм, фотографий, журналов и т. д.). Шифровка ускоряет запись. Обычно шифр содержит дату, номер серии и опыта, номер документа. Например шифр 8.12, 5.7.3 означает: 8 декабря, серия 5, опыт 7, документ 3. Для общего документа к серии опытов номер опыта нулевой.

*Подготовка участка и обрабатываемого материала* включает в себя выбор мест измерений (по размерам, рельефу, конфигурации, положению, сопротивлению, засоренности и т. д.); предварительную обработку участка или материала (полив, выравнивание, измельчение, смешивание компонентов и т. д.), если она требуется; разметку участка: отмечают вешками рабочие проходы требуемой длины при ходе «туда» и «обратно», колышками фиксируют места отдельных измерений (глубины, ширины, засоренности, потерь и т. д.), при необходимости отмечают поворотные полосы, участки рабочих проходов чередуют с участками для остановок и разгона агрегата до и после опыта и т. д., наконец, выполнение первых проходов, являющихся базой отсчета (первой борозды при вспашке) [47].

Иногда для решения этих вопросов приходится проводить специальные исследования и изготавливать специальные приспособления. Например, исследование метода восстановления деталей включает и изучение под-

готовки ее поверхности к наплавке, а использование разного рода смесей (жидких и сыпучих) связано с решением вопроса о способах их смешивания, проверке равномерности распределения компонентов и поддержании состава смеси во время работы (эти вопросы сами по себе могут быть предметом исследования).

*Подготовка машин и оборудования* включает в себя: приведение их в нормальное техническое состояние; определение при необходимости их характеристик (перед снятием тяговой характеристики обязательна проверка мощности двигателя и удельного расхода топлива и т. д.); обкатку или припашку машин, которые позволяют до опытов вскрыть отдельные неисправности и устранить их и приработать поверхности рабочих органов (корпусов, лап, бичей и т. д.).

*Подготовка измерительной аппаратуры* включает следующие вопросы: ознакомление с устройством и правилами эксплуатации приборов, установка их на объект, калибровка или поверка, пробные измерения, настройка и проверка в поле перед началом измерений.

Работа с приборами может быть организована по-разному: исследователь сам или его помощник проводит измерения, а при использовании сложной измерительной аппаратуры (тензометрирование, скоростная киносъемка, запись на магнитограф, обработка на ЭВМ) измерения проводят специалисты, работающие с этой аппаратурой. Поэтому степень знакомства исследователя с ИИС и ее элементами может быть разной.

При работе со специалистом достаточно знать общую характеристику прибора и обсудить со специалистом задачи, программу и методику опытов, условия работы аппаратуры. Часто после этого приходится вносить коррективы в методику исследования. Если измерения проводит сам исследователь или его помощник, то они изучают работу с прибором и подготовку его к измерениям. При этом изучают принципиальное устройство прибора (сложные приборы исследователь не имеет возможности разбирать), управление им, включение в измерительную цепь, установку прибора или датчика на объект, порядок калибровки, основные неисправности и способы их устранения, уход за прибором, технику безопасности при работе с ним. Исследователь обязан проверить умение помощника работать с аппаратурой и первые (пробные) измерения провести совместно с ним.

Установка приборов и датчиков на объект выполняется в строгом соответствии с инструкцией или рекомендацией. Особое внимание обращают на следующие вопросы: время и место установки, положение прибора относительно осевых линий, удобство работы с ним, надежность крепления и сохранность прибора.

Приборы устанавливают до и после калибровки. Некоторые датчики и приборы с целью устранения систематической ошибки калибруют только установленными на объекте вместе с чувствительным элементом (датчики угла поворота рулевого колеса, хода педалей управления, тензометрические устройства и т. д.).

Всегда следует задать себе вопрос, почему прибор установлен именно здесь, а не в другом месте. Цель — предотвратить систематическую ошибку. Например, бачок для замера топлива следует устанавливать дальше от нагретых деталей, датчик крутящего момента можно установить и на валу муфты и на полуосях трактора и т. д.

Положение прибора относительно осевых линий машин и деталей, вертикалей, горизонталей, направления движения часто должно быть определенным. Несоответствие может привести к большой систематической ошибке. Удобство работы с прибором, т.е. считывания показаний, управления, монтажа, безопасность работы и т. д., также влияют на точность измерений и заметно сказываются на скорости выполнения работ.

Обеспечение условий надежной работы прибора по влажности (особенно тензодатчиков), вибрациям и т. д., надежность креплений приборов и приспособлений позволяют предотвратить промахи в измерениях и длительные простои (вплоть до срыва опытов) из-за отказа аппаратуры.

Методика калибровки и проверки приборов в общем виде рассмотрена в главе о точности измерений. Методы калибровки отдельных приборов изложены в инструкциях по их эксплуатации.

*Выполнение пробных измерений* — последний этап при подготовке к опытам. Цель этих измерений — обкатка аппаратуры, проверка ее функционирования, а также тренировка работы с ней, тренировка и проверка работы участников экспериментов. Такие измерения проводят в условиях, близких к рабочим, с анализом результата измерения (близость к реальности, форма и

положение кривых, ясность записи или печати и т. п.), с разбором действий оператора и других участников (правильность, четкость и уверенность в работе, ошибки и их последствия, выделение главного в работе и др.). При этом проверяют также крепления приборов, их температурный режим, удобство работы с ними.

*Некоторые особенности осциллографической записи.* Для определения высоты ординат записи процессов по осциллограмме нужна база отсчета—нулевая линия. Она прочерчивается шлейфом с неподвижным «зайчиком» и может быть одна для нескольких кривых. Иногда нулевые линии проводятся только в начале и конце записи при обесточенном шлейфе (обычно при нехватке каналов), что может внести ошибку, так как нулевая линия неподвижного «зайчика» получается с некоторой кривизной из-за наличия зазоров между лентой и катушкой. Можно внести поправку, сравнивая проведенную по линейке нулевую линию с другой нулевой или с линией записи оборотов чего-либо. При калибровке ИИС в начале совмещают отметки всех обесточенных датчиков с нулевыми линиями, затем, нагрузив каждый датчик до вероятного предела, введением сопротивлений устанавливают масштаб записи так, чтобы записанные затем линии не выходили за пределы бумаги или сильно не переплетались (учитывая при этом и достаточную «чувствительность» записи, т. е. достаточную высоту ординат, которая влияет на ошибку их считывания). Для увеличения масштаба можно нулевые линии располагать по краям ленты с дальнейшим отсчетом ординат вверх и вниз от них. Использовать шлейфы высокой чувствительности нежелательно: они дают «размазанную» линию. Калибровка каждого канала (датчика) выполняется на ленте длиной 0,5...2 м. Ленту шифруют и хранят после ее обработки. Контрольный сигнал осциллографа соразмеряется с калибровочной записью (он нужен для учета старения ИИС).

Во время работы в лаборатории перед записью при разгруженных датчиках проверяют установку шлейфов на нуль (включая и выключая питание датчиков), затем делают короткую запись без нагрузки для проверки совпадения нулей. Выполнив рабочую запись, повторяют запись при разгруженных датчиках. После проявления бумаги прежде всего обращают внимание на совпадение нулевых линий в начале и конце записи. При

этих записях периодически записывают контрольный сигнал.

Аналогичную работу проводят и при осциллографировании в полевых условиях. При надежной работе ИИС и хороших операторах иногда рискуют и описанную проверку совпадения нулевых линий и хода кривых проводят периодически через 2...3 опыта, а не после каждого, надеясь, что запись получится надежной и не придется повторять несколько опытов.

Порой полностью разгрузить датчик не удастся. Тогда в начале после совмещения нулевого «зайчика» и «зайчика» обесточенного рабочего шлейфа записывают нагрузку на датчик в строго определенном положении детали, потом ведут рабочую запись, затем запись нагрузки на датчик в том же определенном положении детали и линии при обесточенном датчике. Положение линий в конце и начале записи сравнивают после проявления осциллограммы.

Все случаи недопустимого расхождения линий фиксируют в полевом журнале, выявляют причины и устраняют их. Осциллограммы считают бракованными, но сохраняют: они могут пригодиться для уточнений.

**Проведение опытов.** Ежедневно, перед началом измерений (и по их окончании), проверяют установку прибора на нуль при отсутствии нагрузки. Для этого снимают, если можно, нагрузку со всех (либо поочередно) чувствительных элементов, проводят проверку и при необходимости установку на нуль стрелок, счетчиков (если можно установить), балансировку мостов. Кроме того, проверяют работу всех каналов (одновременно с балансировкой), напряжение питания, обеспеченность необходимыми материалами и инструментом, а также готовность людей к работе.

Рассмотрим некоторые положения, учитываемые при проведении опытов и дающие высокое качество результатов эксперимента.

Прежде всего это соблюдение разработанной методики. Ее можно лишь дополнить. Если оказывается, что она неверна, опыты следует прекратить и разработать новую методику. Прежде чем вносить изменения в методику, необходимо разобраться (понять), почему был выбран неправильный путь, что можно вывести из самой неправильной постановки вопроса или метода его решения. Даже мелкие изменения нельзя вносить по-



спешно: это может свести на нет всю предварительную трудоемкую подготовку.

Далее, продолжительность опытов каждой серии должна быть минимальной. При длительном перерыве между опытами одной серии всю серию следует повторить, уменьшив тем самым систематическую ошибку, вызываемую изменением условий опытов.

Записи должны быть объективными, сомнительные и интересные факты и соображения необходимо фиксировать. Неожиданные результаты следует проверять, а не отбрасывать. Исправления требуется вносить так, чтобы было видно, что исправлено (именно оно может оказаться впоследствии верным).

Все записи надо вести в специальных, разработанных заранее, журналах. Опыт работы исследователей показывает, что записи на случайных предметах и надежды на свою память практически бесполезны.

**Контроль за ходом эксперимента.** Исследователь должен заранее наметить пути и средства контроля, вплоть до включения в число измеряемых величин контрольной величины. Все методы контроля предполагают систематическую обработку опытных данных.

*Цели и задачи контроля следующие:*

обеспечить точность измерений (возможны ошибки в методике — их нужно раскрыть и принять меры к устранению);

уменьшить трудоемкость и затраты средств при исследовании (возможна ошибка в гипотезе, опыты следует прекратить, программу и методику разработать заново);

уточнить методику (поиск, например, точки перегиба кривой с уточнением интервала изменения переменной);

дополнить программу и методику (может появиться необходимость исследовать влияние дополнительного фактора);

создать возможность для повторения опыта при промахе (пока не изменились условия опытов).

Для контроля целесообразно выделить расчетчика, снабдив его необходимым инструментом и бумагами (миллиметровкой, логарифмической, вероятностной и т.д.), или проводить расчеты самому исследователю.

*Построение графиков зависимости* по получаемым данным и сравнение их с теоретическими или предпола-

гаемыми кривыми — простейший метод контроля. В случае несовпадения кривых следует обязательно найти причину и принять соответствующие меры, вплоть до изменения гипотезы.

*Контроль с использованием уравнения баланса.* Например, измеряя расход воды по нескольким трубам, можно его контролировать по изменению расхода воды по центральной трубе. Исследователь, разрабатывая методику, может предусмотреть это измерение. Разновидностью этого метода можно считать контроль измерения составляющей баланса измерением суммарной величины нескольких составляющих. Величины остальных рассчитывают. Измерения сопротивления плуга можно контролировать измерением крутящего момента на полуосях трактора с ориентировочным расчетом сопротивления его перекатыванию.

*Дуближ измерений* — один из методов контроля. Он заключается в том, что одну и ту же величину с целью контроля измеряют разными методами (глубина пахоты записывается на ленте осциллографа, но ее можно проверить глубиномером).

*Метод контрольных точек или метод экстраполяции.* Исследователь до опытов часто знает, что получаемая кривая должна пройти через определенные точки (например, при отсутствии нагрузки к. п. д. равен нулю, при холостом ходе трактора равна нулю крюковая мощность и т. д.). Исследователь по данным опыта строит кривую и проверяет экстраполяцией возможность прохождения получаемой кривой через контрольную точку. Иногда приходится предварительно преобразовать опытную зависимость, т. е. построить ее в других координатах. Например, если затруднена экстраполяция кривой, то есть смысл «выпрямить» ее, используя приемы, отмеченные в следующей главе.

В заключение можно указать одну рекомендацию, облегчающую контроль, — *все первые измерения, первые контрольные расчеты и весь анализ хода эксперимента выполняется при непосредственном участии исследователя.* Это позволяет ему быстро ориентироваться в измерениях, сделанных его помощниками, и при необходимости принимать соответствующие меры.

К этой главе рекомендуется следующая литература: [9, 18, 22, 33, 34, 38, 47, 51, 69, 70, 81].

# Глава VI

## Методы обработки и анализа ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

### 1. Общие вопросы обработки и анализа

Задача обработки опытных данных — выделение из них полезной информации и представление ее в виде, удобном для анализа, теоретических обобщений и принятия решений. При анализе опытных данных, основные направления которого изложены в главе III, эта информация подвергается преобразованиям в соответствии с используемыми методами анализа, подчиненными решаемым в исследовании задачам.

Методы обработки опытных данных в значительной степени определяются тем, в какой форме они получены, а также задачей, для решения которой они необходимы. При этом информация преобразовывается так, чтобы отдельные стороны явления или процесса проявлялись наиболее четко и ярко, а полученные результаты и принятые решения можно было бы оценить или обосновать количественными показателями. Такой подход обусловлен непрерывно повышающейся требовательностью к доказательности исследований и достоверности их результатов.

Обработка опытных данных условно делится на три этапа.

*Подготовка к обработке* — оценка полученной информации, подготовка первичной документации к обработке, разработка форм таблиц и графиков, организационная подготовка и т. п. Все эти работы в основном выполняет сам исследователь.

*Основная обработка* — определение оценок измеряемых величин и построение опытных зависимостей, предусмотренных программой и методикой. Сюда входят

обработка осциллограмм, заключающаяся в подсчете отметок времени и импульсных счетчиков оборотов; измерении ординат процессов или обработке их с помощью классификатора с кодированием для ввода в ЭВМ и т. п.; обработка кадров кино съемки с целью получения числовых рядов, характеризующих развитие или протекание процессов; внесение поправок в результаты измерений; исключение промахов, определение средних значений величин и их стандартов; заполнение таблиц, содержащих значения известных из гипотез и теоретических разработок факторов; расчеты значений косвенно измеряемых величин и фактической точности измерений; нанесение точек на графики и др. Эта практически механическая обработка проводится помощниками.

*Обработка в процессе анализа* — обработка, определяемая методами этого анализа, — выполняется помощником при непосредственном участии самого исследователя или на ЭВМ. Эта обработка направлена в основном на раскрытие сущности явлений и взаимосвязей.

*Методы математической статистики* используют для обработки и анализа полезной информации, представляющей собой данные типа ряда случайных чисел для определения среднего значения величины, например, глубины обработки, реализации случайного процесса, положим, сопротивления машины, набора пар чисел опытной зависимости  $y=f(x)$  и т. д. Вызвано это большим количеством факторов, формирующих условия использования машин, и большим же количеством сочетаний их конкретных значений, что определяет большую трудоемкость или невозможность эффективного контроля и нейтрализации всех этих факторов. Конечными результатами решения отдельной задачи в этом случае могут быть лишь статистические выводы.

Эти методы позволяют дать количественную оценку явлениям и зависимостям в условиях неопределенности, т. е. при вероятностном их характере, дать оценку может быть не всегда строгую, но лишенную субъективности.

Вместе с тем при решении многих задач с обеспечением достаточной точности измерений контролируемых параметров и показателей (в том числе и изменчивых, таких, как глубина обработки) необходимость в статистическом анализе частично или полностью отпадает, а

статистические выводы в одних случаях могут, а в других должны дополнять, допустим, таблицу результатов или графики.

*Графический, аналитический и табличный, или численный, методы* обработки используют при анализе опытных данных. Первые связаны с графическими построениями, вторые с использованием аналитических выражений зависимостей, третьи с табличными преобразованиями.

Графические методы наиболее просты, наглядны и удобны для инженера, но они наименее точные. Тем не менее, как показывает опыт, в экспериментах, относящихся к механике и электротехнике, например, от исследователя, как правило, требуется лишь простой графический анализ [78]. Он широко используется при исследованиях в области машиностроения и механизации сельского хозяйства.

Аналитические методы наиболее точны, позволяют оценить точность результата, но иногда очень трудоемки в связи с поиском формул опытных зависимостей и чаще всего требуют использования ЭВМ.

Численные методы по точности близки к аналитическим, не требуют поиска формулы зависимости, но во многих случаях связаны с громоздкими вычислениями.

*Сочетание всех этих методов* обычно используется при обработке и анализе опытных данных. В инженерной практике в абсолютном большинстве случаев использованию аналитических и табличных методов предшествуют графическое представление и графический анализ результатов эксперимента. Академик В. П. Горячкин отмечал, что закономерность ряда чисел воспринимается нашим сознанием только в грубых, общих чертах; тот же ряд чисел, представленный в виде графика, уже сразу открывает развитие явления. Развитие ЭВМ постепенно уменьшает использование графических методов анализа, однако график остается важнейшим и простейшим инструментом инженерного исследования. Вместе с этим приближенные графические решения могут уточняться аналитическими и численными методами.

Применяемые методы и приемы обработки и анализа опытных данных должны быть достаточно обоснованы и обеспечивать требуемую точность результатов.

Точность обработки (вычислений, преобразований)

должна соответствовать точности измерений. Используя разные методы (особенно аналитические), исследователь должен иметь представление о том, что можно ожидать и в каком направлении следует вести анализ. «Цель расчета — понимание, а не числа» [73], поэтому используемые методы и все результаты должны быть по возможности физически осмыслены, а статистические выводы достаточно надежны.

Многие методы обработки и анализа наиболее строго обоснованы и доведены до конца (до оценки точности результата) при условии равноточности измерений. Учитывая важность этого, необходимо напомнить, что при наличии случайных ошибок разовые измерения в ряду из  $n$  измерений — равноточные, если они получены при измерениях одним прибором или приборами с одинаковой ошибкой  $\Delta_{\text{приб}}$ , по одной методике, одним оператором в одних условиях (для случайных процессов — в условиях его стационарности, т. е. при одинаковых средних  $\bar{X}$  и стандартах  $\sigma_x$  на отдельных его участках). Это ряды результатов измерений, например, глубины пахоты в одной повторности опытов при правильном выборе участка, времени оборота (рейса) автомобиля определенной марки при отвозе зерна от комбайнов сданного поля на ток. Но если объединить в одних рядах результаты измерений глубины в разных повторностях, измерений времени рейса с разных полей (с разными расстояниями до тока), то первый ряд может получиться неравноточным, а второй, как показывает опыт, будет явно неравноточным (так как с увеличением расстояния увеличивается стандартная ошибка единичного измерения времени). Изменение условий почти всегда ведет к изменению точности измерений. В последнем случае для учета возможных или имеющихся ошибок измерений приходится «делать правдоподобные предположения, основанные на предварительных опытах в аналогичных областях» [8, с. 348] и принимать соответствующие меры.

Два и более ряда — равноточные, если равны их стандарты  $\sigma_{xi}$ . Два и более средних значений — равноточные, если их суммарные стандартные ошибки  $\sigma_{\bar{x}_i}$  равны.

Ниже представлены основные идеи методов и приемов обработки и анализа опытных данных, раскрывающие их возможности, рассмотрены примеры ситуаций,

в которых целесообразно или необходимо применение этих приемов, подчеркнуты особенности их использования вообще и при исследованиях в области механизации сельского хозяйства в частности.

## 2. Подготовка к обработке опытных данных

Перед обработкой необходимо оценить полученную информацию. Первичная оценка ведется в процессе контроля при выполнении опытов. По окончании их дается оценка всей информации с использованием практически тех же методов (см. гл. V п. 7), но цель и задачи этой оценки несколько шире и включают следующие этапы.

**Проверка полноты информации** — все ли документы в наличии, освещают ли полученные данные явления со всех интересующих нас сторон, насколько они соответствуют теории и здравому смыслу, какова фактическая точность отдельных измерений. В связи с этим просматривают замечания по ходу опытов, оценивают возможные ответы на них. Если есть время для проведения дополнительных опытов, решают, нужны ли они.

**Проверка пригодности информации** — отбирают документы промахов, повторенных опытов, данных, связанных с фактором, оказавшимся несущественным, испорченные материалы, после шифровки их исключают и хранят отдельно (они могут потребоваться для уточнения чего-либо).

**Порядок обработки материалов** устанавливают с учетом их оценки. В первую очередь обрабатывают наиболее интересные данные, необходимые для публикаций или внедрения, получают основные зависимости.

Отдельные материалы требуют специальной подготовки. Осциллограмму, например [18], проявленную, зашифрованную, обязательно просматривают, отмечают направление движения ленты, намечают участки осциллограммы для обработки, отбраковывают (зачеркивают), если можно, негодные участки: затемненные, с «выскакивающими» за пределы бумаги кривыми (запись удовлетворительна, если за пределы ленты уходят не более 1 % пиковых значений), со спутанными кривыми и т. д. Осциллограмму «поднимают» — цветными карандашами отмечают спутанные кривые; проводят нулевые линии, если их нет. Просматривают кривые, отме-

чают идентичность кривых разных процессов (амплитуд, частот и фаз их колебаний), определяют приближенно средние значения и стандарты величин для построения предварительных графиков и контроля.

Особой подготовки осциллограмм процессов требует определение их корреляционных функций  $R(\tau)$  и спектральных плотностей  $S(\omega)$ . Причина этого — «местные» нестационарности в записи, которые следует исключить или привести процессы к стационарному виду. Некоторые приемы этой операции изложены в литературе [48, 49], однако следует отметить, что для этого требуются определенные навыки и понимание сущности изучаемого процесса. Наличие случайных нестационарностей при вычислении таких характеристик процесса, как  $R(\tau)$  и  $S(\omega)$ , может привести к существенным ошибкам и искажению явления.

Кодирование данных для ввода в ЭВМ может выполняться по мере необходимости на всех этапах обработки. Чаще всего кодированием или прямым вводом в ЭВМ занимаются операторы вычислительного центра (ВЦ).

Планирование и организационная подготовка обработки опытных данных и проведения опытов аналогичны (см. параграфы 6, 7 главы V).

Общей формой, используемой при обработке результатов опытов, являются таблицы. При подготовке к расчету средних значений и стандартов величин они представляют собой таблицы статистического ряда [18, 19, 64 и др.]. Подсчеты по осциллограмме отметок времени, путемера и т. п., а затем средние и стандарты интересующих величин заносят в таблицы (типа формы 1) — таблицы фиксации данных. В одну таблицу помещают обычно данные одной серии опытов. Но для удобства дальнейшей обработки и анализа в строках пишут сначала отметки всех повторностей одного опыта, затем средние по повторностям, далее все повторности второго опыта, средние по ним и т. д.

При отыскании функциональных связей в таблице, заполняемой по данным таблиц (типа формы 1), вначале выделяют по физическому смыслу независимую переменную (аргумент), помещаемую в первую графу в убывающем или возрастающем порядке, а в остальных графах располагают значения функции или функций, если их несколько. Данные каждой таблицы представляют



серию опытов. Такое построение таблицы позволяет заметить зависимость одного фактора от другого.

**Подготовка форм таблиц:** указывают шифр таблиц, название; нумеруют графы, дают четкое наименование и размерность помещенных в них величин; при отсутствии данных ставят прочерк, а не нуль; цифры одного разряда пишут одну под другой; в каждой графе последние цифры всех строк должны быть одного разряда (в графе с числами 18, 75; 5, 85 число 20 следует записать как 20,00). Примеры оформления таблиц можно найти в пособиях и журналах. Таблицы, соответствующие разным методам анализа, приводятся и используются при описании метода в литературе.

**Построение графиков и их анализ.** Прежде всего следует учитывать условия для получения точности результата, определяемого графическим путем (угловых коэффициентов прямых, отклонений опытных точек от теоретической кривой и т. д.). Поэтому при построении графиков опытных зависимостей (рабочих, а не иллюстративных) следует соблюдать некоторые общие принципы.

Минимальные деления шкал  $\Delta L_{\min}$  должны быть примерно равными вероятным ошибкам  $\rho$  соответствующих измеряемых величин, чтобы на графике можно было точно определить верные цифры числа, соответствующего опытной точке, и точно или приблизительно первую сомнительную (см. гл. IV, п. 12). Это возможно, если  $\Delta L_{\min} = 1 \dots 2$  мм (рис. 18, *середина*). Отсюда масштаб по шкале  $m_L \approx \rho / \Delta L_{\min}$  с округлением до чисел ряда (1; 2; 2,5; 5)  $10^n$ , где  $n$  — любое целое отрицательное и положительное число, включая нуль. С другими значениями масштаба не удобно работать. Против делений шкал указывают числа, кратные числам этого же ряда. Удобно использовать: при определении вида опытной зависимости по графику  $\Delta L_{\min} \approx 10\rho = 1 \dots 2$  мм — тог-

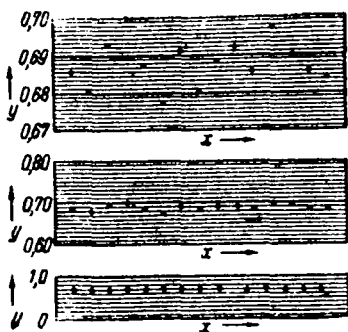


Рис. 18. Зависимости  $y=f(x)$  при разных масштабах по оси  $y$ ; вероятная ошибка  $\rho_y = 0,01$ .

да зависимость сглаживается (рис. 18, *низ*); при графическом определении параметров опытной зависимости  $\Delta_{L\min} \approx (0,1 \dots 1,0) \rho = 1 \dots 2$  мм — легче измерять отклонения точек от гладкой линии и площадей, ограниченных этой линией и ломанной, соединяющей точки (рис. 18, *верх*); при работе со сглаженными зависимостями (например, при дифференцировании) целесообразно выбирать наименьшее возможное с учетом формата бумаги, значение масштаба  $m_L \leq \rho / \Delta_{L\min}$  для повышения точности результата.

Следует пытаться при обработке представлять зависимости в виде прямой: ее легко построить, у нее только два параметра, упрощена интерполяция и экстраполяция и т. д. Для этого используют бумаги с разными шкалами (миллиметровая, логарифмическая, вероятностная и др.) или зависимость преобразуют так, чтобы в обычных координатах она выглядела в виде прямой линии (см. с. 213).

Линия на графике должна располагаться под углом около  $45^\circ$  и проходить через весь график, а не теряться в углу или вверху, поэтому начала отсчетов (нули) не следует стремиться помещать на графике.

**Некоторые замечания по оформлению графика.** Шкалы строят до нанесения кривых, определив предварительно  $x_{i\max} - x_{i\min}$  и  $y_{i\max} - y_{i\min}$ ; значение делений не всегда нужно указывать у каждого из них; опытные точки наносят обозначениями: точка, кружок, треугольник, квадрат, крестик с точкой опыта в середине значка; шкалы обязательно обозначают и указывают единицы измерения; надписи на поле графика нежелательны — используются условные обозначения, расшифрованные в подписи к нему; обозначения шкал, единиц измерений по ним и другие надписи должны располагаться ниже верхнего и левее правого деления шкал, если на графике одна зависимость.

При обработке результатов эксперимента таблицы используют для вычислений (средних, стандартов, ошибок и т. д.) и для построения графиков.

Графики обычно помещают в тексте, таблицы — в приложениях.

### 3. Оценки значений измеряемых величин

При прямых измерениях оценками средних значений и точности измерений случайных величин являются ста-

статистические средние  $\bar{X}$  и стандарт  $s_x$  или  $s_{\bar{x}}$ , определяемые по ряду  $n$  разовых измерений, причем возможно и  $n=1$ .

При равноточном ряде измерений и небольших  $n$  оценки  $\bar{X}$ ,  $s_x$  и  $s_{\bar{x}}$  определяют по формулам (IV.4; IV.8), а  $\Delta_{\bar{x},H}$  — по (IV.9 или IV.10). Если  $n$  велико (порядка 30 и более), то значения  $x$  от  $x_{i\min}$  до  $x_{i\max}$  разбивают на  $k$  интервалов или классов (прием очень широко используется при статистической обработке) и определяют количество  $m_j$  ( $j=1, 2, \dots, k$ ) значений  $x_i$ , попадающих в каждый интервал. Тогда с суммированием по  $j$  от 1 до  $k$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum m_j \bar{x}_j; \quad s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum m_j (\bar{X} - \bar{x}_j)^2, \quad (\text{VI.1})$$

где  $\bar{x}_j$  — значение  $x$  в середине  $j$ -го интервала.

Так как  $n$  велико,  $\Delta_{\bar{x},H}$  можно найти по (IV.9).

Для предварительного определения количества классов  $k'$  можно воспользоваться рекомендациями [18, 52]. Например,

|                      |         |         |          |
|----------------------|---------|---------|----------|
| количество измерений | 10...30 | 31...70 | Более 70 |
| количество классов   | 5       | 6...9   | 10...12  |

Классовый интервал  $h$  ориентировочно находят как  $(x_{i\max} - x_{i\min})/k'$ ; округляют, чтобы  $\bar{x}_j$  были не слишком дробными, а затем уточняют количество классов  $k$ . Тогда  $\bar{x}_j = x_{i\min} + (j-0,5)h$ , а границы  $j$ -го класса  $x_j \pm 0,5h$ .

**Пример VI.1.** Обработывают ряд измерений с  $n=60$ ;  $x_{i\min}=53,5$ ;  $x_{i\max}=89,5$ . Положим,  $k'=8$  и  $h=(89,5-53,5)/8=4,5$ . Удобно взять  $h=5$  и  $k=(89,5-53,5)/8=7,2 \approx 8$ . Тогда, например,  $\bar{x}_4=53,5+3,5 \cdot 5=71$ , а границы четвертого интервала 68,5...73,5.

Если значение  $x_i$  попадает на границу двух классов, то его учитывают по 0,5 в  $m_j$ , разделяемых этой границей классов [19].

При неравноточных измерениях разную точность отдельных измерений учитывают введением весов измерений. (*Вес измерения* — одно из важнейших понятий статистики.) Их выбирают так, чтобы более точные измерения больше влияли на значения оценок, но и менее точная информация уточняла бы оценку. С неравноточными измерениями приходится сталкиваться, когда оценки находят по значениям  $\bar{x}_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), являющимися средними для  $i$ -тых повторностей опытов и найденным по  $n$  рядам из  $m_i$  равноточных измерений с

$s_{xi} \approx \sigma_{xi}$ . Значения  $\bar{x}_i$  могут быть неравноточными по разным причинам; разная изменчивость величины  $x$  на различных участках поля, разное количество измерений  $m_i$  и т. д.

Обычно в качестве весов измерений используют величины, обратные квадратам стандартов  $\sigma_{\bar{x}_i}^2$  (напомним, что возможно  $m_i=1$  при некоторых  $i$  и тогда  $\sigma_{\bar{x}_i} = \sigma_{xi}$ ;  $S_{\bar{x}_i} = s_{xi}$ ).

$$p_i = 1/\sigma_{\bar{x}_i}^2 = m_i/\sigma_{xi}^2 \text{ при } (\sigma_{xi}; m_i) \neq (\sigma_{xi+1}; m_{i+1})$$

для некоторых  $i$ ; (VI.2)

$$p_i = m_i \text{ — при } \sigma_{xi} = \text{const}; m_i \neq \text{const}; \text{ (VI.2a)}$$

$$p_i = 1/s_{\bar{x}_i}^2 = m_i/s_{xi}^2 \text{ — при неизвестном } \sigma_{xi}. \text{ (VI.2б)}$$

Тогда суммированием по  $i$  от 1 до  $n$

$$\bar{X} = \frac{1}{p} \sum p_i \bar{x}_i; s_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{p(n-1)} \sum p_i (\bar{x}_i - \bar{X})^2; p = \sum p_i. \text{ (VI.3)}$$

Значения  $\Delta_{\bar{x}, H}$  при  $p_i$ , соответствующих (VI.2 и VI.2a) определяют по (IV.10) с  $k=n-1$ ; при  $p_i$ , соответствующих (VI.2б) — приближенно по (IV.9) с заменой  $\sigma_{\bar{x}}$  на  $s_{\bar{x}}$  [64].

Если в выражение (VI.3) подставить  $p_i=1$  (тогда  $p=n$ ), то получим формулу для равноточных измерений. При этом  $\Delta_{\bar{x}, H}$  найдем из уравнения (IV.10).

**Пример VI.2** (данные утрированы). При разовых взвешиваниях на трех весах разной точности одного объекта получены результаты (кН):  $x_1=4,0$ ;  $\sigma_{x1}=0,2$ ;  $x_2=4,5$ ;  $\sigma_{x2}=0,5$ ;  $x_3=5,0$ ;  $\sigma_{x3}=1,0$ . Определить  $\bar{X}$  и  $s_{\bar{x}}$ . Здесь  $m_1=m_2=m_3=1$ ;  $n=3$ . Расчет по (IV.4) дает маловероятный результат:  $(4+4,5+5)/3=4,5$ . При расчете по (IV.3) с  $p_1=1/0,04=25$ ;  $p_2=1/0,25=4$ ;  $p_3=1$  и  $p=25+4+1=30$ ,

$$\bar{X} = \frac{1}{30} (25 \cdot 4 + 4 \cdot 4,5 + 1 \cdot 5) = 4,1; s_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{30(3-1)} \times \\ \times [25(4-4,1)^2 + 4(4,5-4,1)^2 + 1(5-4,1)^2] = 0,028; s_{\bar{x}} = 0,17.$$

Использование дополнительных очень неточных данных позволило уточнить оценки.

Вопрос об известности  $\sigma_{xi}$  можно решить с учетом изложенного на странице 111.

#### 4. Статистический анализ опытных данных

**Проверка статистических гипотез.** Аппарат статистической проверки гипотез разработан для контроля согласованности гипотез, относящихся к свойствам генеральной совокупности в целом, с фактическим материалом (например, с рядом экспериментальных данных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), представляющим собой ограниченные по количеству выборки реализаций случайных величин или процессов.

Статистические гипотезы — это предположения, относящиеся к виду распределения, параметрам распределения случайных величин или к характеристикам совокупности случайных величин. Как правило, формулируется одна основная гипотеза — нуль гипотеза  $H_0$  — и одна альтернативная (противоположная) гипотеза  $H_1$ .

Выбор проверяемых гипотез должен проводиться до начала анализа данных. Появление новой гипотезы в процессе анализа требует проведения дополнительного эксперимента [27].

Ниже приведены примеры гипотез, которые приходится или необходимо использовать практически в любом исследовании. С помощью проверки статистических гипотез даются ответы на вопросы типа: соответствуют ли принятые допущения действительности, опытные данные условиям применения метода анализа, качество работы агротребованиям; не изменяется ли качество работы с введением эффективного по производительности приема и т. п.

*Гипотеза 1.* Выборка — случайная и независимая. Она может быть и не такой, возможно систематическое изменение среднего значения величины в ходе выборочного обследования. Например, могут изменяться средние масса и размеры корнеплода от начала ряда к его концу, средние глубины обработки вследствие износа рабочих органов и т. д.

*Гипотеза 2.* Результаты эксперимента однородны. Однородны дисперсии и распределения случайных величин у равноточных рядов измерений. Иногда несколько выборок объединяют в одну. Построение кривой распределения сразу показывает неоднородность суммарной выборки — кривая имеет несколько «горбов».

*Гипотезы 3 и 4.* Среднее значение нормально распределенной генеральной совокупности равно определенной

величине или средние значения двух (и более) выборок равны. Это проверка равенства средних глубины обработки, массы и размеров изделий, моторесурса после ремонта и других заданным значениям; проверка зависимости глубины обработки, сопротивления почвы и др. от разной настройки машин, скорости движения, от параметров машин и т. п.

*Гипотеза 5.* Отклонение одного члена выборки от других не случайно. Это решение вопроса об исключении промаха, рассмотренного в главе IV, параграфе 6.

*Гипотеза 6.* Дисперсия нормально распределенной совокупности равна определенному значению или не более заданной. Особое значение эта гипотеза приобретает при оценке качества (устойчивости) технологического процесса, когда допускаемые отклонения задаются из технологических или других соображений: колебания глубины заделки семян, степень измельчения листостебельной массы и т. д.

*Гипотеза 7.* Дисперсии двух (и более) выборок равны (или однородны). Решается вопрос о равнозначности двух приборов, двух методов измерений или двух рядов измерений; об устойчивости технологического процесса или движения при изменении параметров, настройки или износа машины; вопрос стационарности случайного процесса и т. д.

*Гипотеза 8.* Закон распределения случайной величины нормальный или симметричный (или пуассоновский, экспоненциальный и др.). Она используется при оценке точности сложных измерений и при использовании некоторых критериев проверки статистических гипотез, при обосновании использования методов теории массового обслуживания, при проверке нормальности стационарного случайного процесса и т. п.

Без проверки самых разных статистических гипотез практически невозможно статистическое моделирование (например, по методу Монте-Карло), очень тесно с ней связаны теория эксперимента и системный подход.

Каждую статистическую гипотезу проверяют по статистическому критерию — так называется однозначно определенное правило, устанавливающее условия, при которых проверяемую гипотезу следует принять или отвергнуть.

Уровнем значимости критерия  $\alpha$  называют вероятность напрасно отвергнуть гипотезу  $H_0$ . Гипоте-

за  $H_0$  отвергается с уровнем значимости  $\alpha$ , если выборочное значение критической статистики (см. ниже) соответствующей статистическому критерию, попадает вне допустимого интервала, соответствующего вероятности  $1-\alpha$ , называемой критерием значимости.

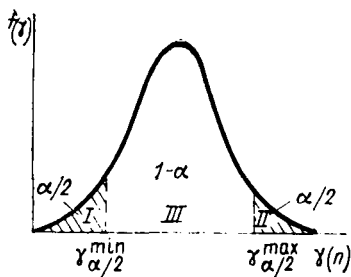


Рис. 19. Области принятия и отбрасывания гипотез.

Большинство статистических гипотез проверяют по следующей общей логической схеме [33, 42 и др.];

1. Выдвигают предположение (гипотезу)  $H_0$ ;

2. Задают значение уровня значимости  $\alpha$ , обычно  $\alpha=0,05$ . В источнике [78], например, отмечается, что если гипотезу отвергнуть, то вероятность 0,05 еще дает основания сомневаться; 0,01 убедительно показывает, что две выборки относятся к разным совокупностям, а 0,001 дает почти полную гарантию несправедливости гипотезы.

3. Задают некоторую функцию от результатов наблюдений (критическую статистику), допустим,  $\gamma(n)$ . Эта статистика, часто носящая имя автора (критерий Пирсона, Колмогорова и т. п.), сама является случайной величиной и в предположении о справедливости гипотезы  $H_0$  подчинена какому-нибудь хорошо известному закону (нормальному, Стьюдента,  $\chi^2$ , Фишера и др.).

4. Из таблиц этого распределения находят  $100(1-\alpha/2)$  и  $100(\alpha/2)$  — процентные точки  $\gamma_{\alpha/2}^{min}$  и  $\gamma_{\alpha/2}^{max}$ , разделяющие область значений случайной величины  $\gamma(n)$  на три части (рис. 19): I — область неправдоподобно малых значений, III — вероятных значений и II — неправдоподобно больших. Когда «опасность» представляют односторонние отклонения, находят лишь одну точку: либо  $(100-\alpha)$ , либо  $100\alpha$  — процентную точку  $\gamma_{\alpha}^{min}$  или  $\gamma_{\alpha}^{max}$ , разделяющую область на две части, одна из которых область вероятных значений, другая — неправдоподобно малых или больших. Отыскание этих точек облегчает дальнейшее решение при отсутствии навыков.

5. В функцию  $\gamma(n)$  подставляют данные из выборки и подсчитывают ее значение. Если оно лежит в области вероятных значений, то гипотеза  $H_0$  с вероятностью  $1-\alpha$  считается не противоречащей опытным данным. Предположение  $H_0$  не следует расценивать как абсолютно верный факт — это правдоподобное, не противоречащее опыту утверждение. Часто удобно не задаваться значениями  $\alpha$ , а найти по рассчитанному  $\gamma(n)$  значение  $\alpha$ , при котором гипотеза  $H_0$  отвергается. Число  $\alpha$ , полученное таким образом, называется  $P$ -значением.

**Пример VI.3.** Сравнение средних нормально распределенных совокупностей при известных дисперсиях. Проведено две серии равнозначных измерений, которым соответствуют  $\bar{x}_1 = 23,56$ ;  $\sigma_{x_1} = 1,2$ ;  $n_1 = 25$  и  $\bar{x}_2 = 22,8$ ;  $\sigma_{x_2} = 1,2$ ;  $n_2 = 50$ . Гипотеза  $H_0: m_{x_1} = m_{x_2}$ . Уровень значимости  $\alpha = 0,05$ . Критическая статистика

$$\gamma(n) = t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma_x \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}} = \frac{23,56 - 22,80}{1,2 \sqrt{1/25 + 1/50}} = 2,59. \quad (\text{VI.4})$$

Она распределена по нормальному закону. При двустороннем ограничении по таблице интеграла (IV.5) находим  $t_{1-\alpha/2} = t_{\alpha/2}^{\max} = 1,96 < t$  и гипотеза о равенстве средних отвергается с вероятностью 0,95.  $P$ -значение, соответствующее  $1-\Phi(2,59)$ , равно 0,01, т. е. вероятность ошибочно отвергнуть гипотезу  $H_0$  равна 0,01 — она отвергается с надежностью (вероятностью) порядка 0,99.

При неизвестных и неравных дисперсиях (например, при измерении разными приборами) проверка гипотезы усложняется [8].

**Пример VI.4.** Сравнение двух дисперсий нормальных совокупностей. (Сравнение точности двух приборов при калибровке.) По двум сериям измерений с числом измерений  $n_1 = 200$  и  $n_2 = 15$  получены эмпирические дисперсии  $s^2_{x_1} = 3,82$  и  $s^2_{x_2} = 2,0$  (индекс 1 должен соответствовать большей дисперсии). Гипотеза  $H_0: \sigma_{x_1} = \sigma_{x_2}$ . Уровень значимости  $\alpha = 0,05$ . Критическая статистика (критерий Фишера)

$$s_1^2/s_2^2 = F > 1. \quad (\text{VI.5})$$

Статистика  $F$  соответствует  $F$ -распределению при степенях свободы  $k_1 = n_1 - 1$  и  $k_2 = n_2 - 1$ . При  $P = 1 - \alpha$  (одностороннее ограничение) и  $k_1 = 199$ ;  $k_2 = 14$ ;  $F_{\alpha}^{\max} = 2,13 > F = 3,82/2 = 1,91$ , что не дает оснований считать расхождение дисперсий значимым на уровне 0,05.

**Пример VI.5.** Исключение промаха при неизвестной дисперсии [18]. Измерения мощности на привод механизма дали результаты (кВт): 2,2; 2,8; 2,4; 2,6; 4,3. Сомнителен результат 4,3. Гипотеза  $H_0$  предполагает, что отклонение значения 4,3 от остальных случайно;  $\alpha = 0,01$ . Критическая статистика

$$t_{n,\alpha} = \frac{x_{i\text{пром}} - \bar{X}}{s_x} = \frac{4,3 - 2,5}{0,26} = 6,9, \quad (\text{VI.6})$$

где  $\bar{X}$  и  $s_x$  вычисляют по формуле (IV.4) без учета  $x_{i\text{пром}}$ . Крити-



ческая статистика  $t_{n,k}$  распределена по закону Стьюдента; при  $H=1-\alpha=0,99$  и  $k=n-1=4$  она равна  $6,53 < 6,9$ , т. е. значение 4,3 можно считать браком.

**Пример VI.6.** Использование критерия  $\chi^2$  [78]. Этот критерий применим, когда данные эксперимента представляют число объектов; количество результатов измерений, попавших в  $j$ -тый класс; число отказавших машин, бракованных деталей, поврежденных корнеплодов и т. д., которые могут зависеть от дня недели, настройки машин и других факторов. Например, двигатели комбайнов ремонтируют в хозяйстве и на специализированном заводе. В течение первой недели работы наблюдалось  $O_1=5$  отказов первых и  $O_2=9$  вторых (двигатели вновь ремонтировались и работали). Гипотеза  $H_0$  такова: число отказов  $O_1$  и  $O_2$  одинаково (одинаково качество ремонта),  $\alpha=0,05$ . Критическая статистика

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} = \frac{(5-7)^2}{7} + \frac{(9-7)^2}{7} = 1,14, \quad (\text{VI.7})$$

где  $E_i$  — математические ожидания этих событий.

При данной гипотезе  $E_1=E_2=(O_1+O_2)/2$ . Статистика  $\chi^2$  распределена по  $\chi^2$ —распределению с  $k$  степенями свободы. В данном случае  $n=2$ . Получив одно независимое наблюдение  $O_1$ , можно по нему и по  $E_1$ ,  $E_2$  найти результат другого, поэтому  $k=n-1=1$ . По таблице  $\chi^2$  находим, что при  $k=1$  за счет чисто случайных факторов значение  $\chi^2$  при  $\alpha=0,05$  может быть равно 3,84 и гипотеза  $H_0$  не противоречит опытным данным. Если бы отношение  $O_1:O_2=5:9$  сохранялось и при дальнейшей работе двигателей (до  $O_1=20$ ;  $O_2=36$ ), то гипотезу следовало бы отвергнуть при заданном уровне значимости. Отсюда следует, что критерий  $\chi^2$  очень чувствителен к объему выборки и для получения значимого результата необходим большой объем данных — минимальные ожидаемые числа событий одного рода ( $O_1$  и  $O_2$  в данном примере) равны пяти. При рассмотрении гипотезы о законе распределения целесообразно иметь близкие значения  $O_i$ , для чего при разделении данных на классы первые ( $i=j=1; 2$ ) и последние ( $i=j=k-1; k$ ) интервалы берут обычно большими, чем средние.

Отметим, что при неизвестном перед обработкой виде закона распределения его можно уточнить, пользуясь системой кривых Пирсона [33, с. 61].

При проверке многих гипотез необходимо знать число степеней свободы — число независимых наблюдений, равное числу наблюдений или измерений (или групп измерений при разделении на классы) минус число наложенных на совокупность этих измерений связей. Наиболее распространены три связи: сумма частот появления наблюдаемых значений случайной величины равна единице; статистические средние значения величины  $\bar{X}$  и стандарт  $s_x$  равны истинным среднему значению величины  $m_x$  и стандарту  $\sigma_x$ . Проверяя гипотезу о законе распределения по критерию  $\chi^2$  (Пирсона) при неизвест-

ных  $m_x$  и  $\sigma_x$ , налагают эти три связи. При использовании критерия Стьюдента (показатель  $t_{H,k}$ , с. 110) связь одна — первая. Каждая связь показывает, что одно из наблюдений зависимо от остальных. Например, связь  $\bar{X} = m_x$  по известным  $x_i = x_1; \dots; x_{n-1}$  позволяет определить  $x_n$ , а при известном  $m_x$  сделать это уже нельзя, так как  $\bar{X} \neq m_x$ .

**Дисперсионный анализ.** Часто возникает необходимость в ответе на вопрос, оказывают ли какое-либо влияние отдельные, предположительно влияющие факторы на выходные показатели объекта исследования. Например, при вспашке наблюдаются большие колебания глубины обработки, которые зависят от рельефа поля, скорости движения агрегата, массы плуга и агрегата, остроты лемехов и др. Степень влияния каждого из этих факторов с наименьшим числом опытов позволяет выявить дисперсионный анализ. Метод применяется также для установления причин изменения технологических, экономических и других показателей производственных процессов. Однако дисперсионный анализ не позволяет выявить степень влияния, оцениваемую количественно, его форму (вид зависимости).

Рассмотрим суть метода на примере однофакторного дисперсионного анализа. Изучаемый фактор  $A$  изменяется на  $m$  уровнях ( $1, 2, \dots, i, \dots, m$ ). На каждом уровне сделано  $n_i$  (партия) измерений выходного показателя и зафиксированы его значения  $x_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, n_i$ ). При обработке определяют средние значения величины  $\bar{x}_i$  и дисперсии  $s^2_{xi}$  для каждой партии и проверяют гипотезу об однородности дисперсий  $s^2_{xi}$  (неоднородность их может быть из-за действия неучтенного фактора разной природы или из-за методических ошибок). При однородных дисперсиях находят общее среднее значение  $\bar{X}$ , допустим, по формуле (VI.1); вычисляют дисперсию  $s^2_A$ , характеризующую рассеивание по факторам — разброс значений  $\bar{x}_i$ , около  $\bar{X}$ , затем дисперсию  $s^2_n$  (остаточную), характеризующую среднее для всех партий рассеивание внутри партий, т. е. разброс  $x_{ij}$  около  $\bar{x}_i$ , и полную (общую дисперсию  $s^2$ , учитывающую общее рассеивание как внутри партий, так и за счет изменения фактора, — разброс  $x_{ij}$  около  $\bar{X}$ ).

Далее проводят собственно дисперсионный анализ. Рассматривают отношение  $F = s^2_A / s^2_n$  (по методике, указанной в примере VI.4). Если при заданном  $\alpha$  и сте-

пенях свободы  $f_1 = m - 1$ ;  $f_2 = \sum n_i - m$  значение  $F$  больше табличного, то влияние фактора существенно и мы имеем  $m$  нормально распределенных совокупностей (они отличаются математическими ожиданиями) с одинаковой дисперсией  $s^2$  и со средними  $\bar{x}_i$ . Вид зависимости будет установлен при дальнейших исследованиях. Если значение  $F$  меньше табличного, то имеется одна совокупность с параметрами  $s^2$  и  $\bar{X}$ .

Для дисперсионного анализа чрезвычайно важна случайность отбора данных  $x_{ij}$ , правильность определения степеней свободы. Процедура анализа упрощается, а точность его повышается при равных  $n_i$  на каждом уровне фактора.

**Пример VI.7.** Сравним уровень использования тракторов ДТ-75 в трех бригадах. Для этого взяты их дневные выработки за последние 10 дней в каждой бригаде (эт. га/день):  $x_{1j} = 8,8; 8,2; 9,3; 9,2; 9,6; 7,7; 9,0; 8,7; 9,2; 9,3$ ;  $x_{2j} = 8,9; 7,1; 8,0; 8,2; 7,5; 6,8; 8,3; 8,2; 7,0; 9,0$ ;  $x_{3j} = 7,7; 6,3; 7,6; 6,4; 7,3; 6,8; 6,9; 6,5; 7,3; 7,2$ ;  $m = 3$ ;  $n_i = n = 10$ . Средние:  $\bar{x}_1 = 8,9$ ;  $\bar{x}_2 = 7,9$ ;  $\bar{x}_3 = 7,0$ . Дисперсии:  $s_{x1} = 3,0$ ;  $s_{x2} = 5,4$ ;  $s_{x3} = 2,2$  — они однородны с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$ . Среднее  $\bar{X} = 7,9$ . Дисперсии при  $n_1 = n = \text{const}$ :

$$s^2_A = \frac{n}{m-1} \sum (\bar{x}_i - \bar{X}) = 9,1$$

со степенями свободы  $f_1 = m - 1 = 2$ ; остаточная  $s_n^2 = \sum s_{xi}^2 / m = 3,6$  при  $f_2 = m(n - 1) = 3(10 - 1) = 27$ . Отношение  $F = s_A^2 / s_n^2 = 9,1 / 3,6 = 2,53$ . В таблице при  $f_1 = 2$ ;  $f_2 = 27$  и  $\alpha = 0,05$  значение  $F = 3,35 > 2,53$  и утверждать, что выработка тракторов ДТ-75М в бригадах разная нельзя. Проверка гипотезы 4 (с. 187) даст тот же результат.

Дисперсионный анализ характерен тем, что нельзя в данном случае отрицать влияние фактора — вопрос остается открытым и требует дополнительного исследования (чаще всего увеличения числа опытов).

**Корреляционный анализ.** Две случайные величины  $x$  и  $y$  могут быть независимы, связаны функциональной или статистической зависимостью. В функциональных зависимостях каждому значению  $x$  соответствует одно значение  $y$ . В статистических или корреляционных — одному значению  $x$  может соответствовать несколько значений  $y$ , и изменение первой величины влечет за собой изменение распределения второй. Такие зависимости получают, когда на величину  $y$  наряду с фактором  $x$  действует ряд других, имеющих в каждом конкретном случае определенные значения, и значения эти встречаются в разных сочетаниях. Связь статистическая

заключается в том, что с изменением одной величины изменяется среднее значение другой.

Приведем некоторые примеры.

*Пример первый.* Между расходом топлива трактором определенной марки  $Q$  и затратами средств на его ремонт  $E_p$  существует линейная корреляционная зависимость вида  $E_p = a + bQ$ , где  $a$  и  $b$  — коэффициенты. Такая зависимость обусловлена тем, что износ машин, а следовательно, и затраты на ремонт, зависят от затрат энергии и топлива. Но они зависят также и от уровня организации ремонта — концентрации ремонтного производства и его технологии в разных районах области, от уровня технического обслуживания и т. д. В двух районах ремонт специализирован, но технология ремонта разная, в третьем нет специализации, но технология та же, что в первом, и т. д.

*Пример второй.* Урожайность культур зависит от энергонасыщенности хозяйств (суммарной мощности двигателей, приходящейся на 1000 га сельскохозяйственных угодий), которая влияет на выполнение необходимого объема работ в растениеводстве в оптимальные сроки. И эта зависимость корреляционная, так как урожайность зависит от ряда других факторов — применения удобрений, используемых сортов растений, почвенно-климатических условий и т. д.

Можно заметить, что для получения перечисленных зависимостей нет необходимости ставить опыты — требуется лишь собрать статистические данные, положим, из учетной и отчетной документации.

Как показывает опыт, в исследованиях по механизации сельского хозяйства (и в других областях) встречаются только корреляционные зависимости, но при небольшом разбросе точек часто эти зависимости считают функциональными. Последние получаются чаще всего в специально поставленных экспериментах с нейтрализацией факторов, вызывающих разброс точек. С учетом общности разных типов связей методы и приемы корреляционного анализа приложимы ко всем опытным зависимостям.

Корреляционная зависимость может связывать и группу факторов — в этом случае рассматривается множественная корреляция.

*Уравнения регрессии (отклика)* — это уравнения, отражающие корреляционные связи.

Следует отметить, что, прежде чем устанавливать корреляционную связь по статистическим данным, необходимо попытаться разобраться с физической сущностью связи факторов — в приведенных примерах она показана. Это позволит обосновать выбор статистических данных и даст возможность в дальнейшем наметить пути перехода к функциональным связям, а иногда и к рациональным формулам.

Характерная черта корреляционных связей — связь между двумя интересующими нас факторами через ряд промежуточных факторов и связей. Например, от расхода топлива к стоимости ремонта переход упрощенно выглядит так: топливо → энергия → износ → ремонт → стоимость ремонта. Поэтому определить физическую сущность связи не всегда удастся, особенно при множественной корреляции. В этом случае на первом этапе рассматривают, как и в теории планирования эксперимента, все предположительно влияющие факторы, а затем исключают несущественные и сильно коррелированные. Примером такого подхода может быть работа [6], причем там на первом этапе рассмотрена парная корреляция — связь двух факторов.

Выдвинув гипотезу о наличии корреляционной связи, данные целесообразно нанести на график (рис. 20). Если точки с достаточной точностью лягут на гладкую линию, то она определит функциональную зависимость.

*Простая линейная корреляция* будет в том случае, если точки образуют «облако», вытянутое корреляционное поле, с осью, наклоненной к осям координат (рис. 20).

*Нелинейная корреляция* налицо, если точки «облака» группируются около кривой, образуя полосу точек. Чем ближе располагаются точки к оси облака или кривой, тем теснее связь между величинами.

Статистические сведения должны отвечать определенным требованиям. Количество «точек» должно быть достаточно большим (не менее десяти) с относительно

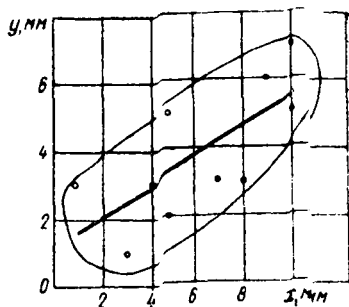


Рис. 20. Корреляционная зависимость.

равномерным распределением по интервалу аргумента. «Облако» не должно распадаться на отдельные «облачка» — в противном случае данные неоднородны, для каждой группы точек существуют свои зависимости или объединены в одну разные совокупности, или при сборе данных не были учтены тенденции и направления развития как объектов и явлений, между которыми устанавливается связь, так и промежуточных. Сведения должны быть типичными, соответствовать сопоставимым условиям.

Один из источников ошибок при использовании методов корреляции и регрессии связан с тем, что несколько подгрупп или совокупностей объединяются в одну [27]. Например, корреляционные связи между параметрами тракторов (мощность и момент двигателя, масса трактора и др.) пятидесятых и семидесятых годов существенно отличаются, так как первым соответствовала тенденция увеличения тяговых усилий тракторов, а вторым — повышение рабочих скоростей и энергонасыщенности.

Ниже методы и приемы корреляционного анализа рассмотрены на примерах простой линейной корреляции.

*Задача собственно корреляционного анализа* сводится к определению типа корреляции (линейная, нелинейная) и меры зависимости или тесноты связи между величинами.

*Задача регрессионного анализа* — нахождение математического ожидания функции (уравнения регрессии) и ее дисперсии.

По данным рисунка 20 можно заметить, что при возрастании случайной величины  $x$  величина  $y$  имеет тенденцию возрасти (в других случаях убывать) по линейному закону.

*Коэффициент корреляции  $r$*  используется для оценки указанного факта. Тенденция может быть более или менее ярко выраженной, может приближаться к функциональной, т. е. самой тесной линейной связи. Степень тесноты линейной связи и отражает коэффициент корреляции. Он показывает, что при изменении случайной величины  $x$  на величину  $\sigma_x$  случайная величина  $y$  в среднем изменится на  $r\sigma_y$ .

При  $n \geq 30$  значение

$$r = (\sum x_i y_i - n \bar{X} \bar{Y}) : \sqrt{(\sum x_i^2 - n \bar{X}^2) (\sum y_i^2 - n \bar{Y}^2)} \quad (\text{VI.8})$$

с суммированием по  $i$  от 1 до  $n$  и расчетом  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  по (IV.4)

Ошибка (стандарт) коэффициента корреляции при  $n \geq 30$

$$m_r = \pm (1 - r^2) / \sqrt{n} \quad (\text{VI.9})$$

и при  $r > 3m_r$  значение  $r$  считается надежным.

Пример VI.8. Положим, с осциллограммы рисунка 8 сняты через 0,1 с значения ординат  $R$  и  $a$ , записанные в таблице 7 (можно оперировать со значениями ординат, а не с абсолютными значениями  $R$  и  $a$ ) и представленные на рисунке 20, позволяющие предположить наличие линейной корреляции. По равенству (IV.4):

$$R = \bar{X} = \frac{1}{10} (1 + 3 + 4 + \dots + 10) = 6,2;$$

$$\bar{a} = \bar{Y} = \frac{1}{10} (3 + 1 + 5 + \dots + 5) = 3,8.$$

Члены формулы (VI.8):  $\sum x_i y_i = 1 \cdot 3 + 3 \cdot 1 + 4 \cdot 3 + \dots + 10 \cdot 5 = 272$ ;  $n \bar{X} \bar{Y} = 10 \cdot 6,2 \cdot 3,8 = 235,6$ ;  $\sum x_i^2 = 1 + 9 + 16 + \dots + 10 \cdot 5 = 468$ ;  $n \bar{X}^2 = 384$ ;  $\sum y_i^2 = 9 + 1 + 9 + \dots + 25 = 194,0$ ;  $n \bar{Y}^2 = 144,4$ . Тогда  $r = (272 - 235,6) : \sqrt{(468 - 384)(194 - 144,4)} = 0,56$ . По уравнению (VI.9):  $m_r = (1 - 0,32) / \sqrt{10} = 0,22$ . Значение  $r < 3m_r$  и недостаточно надежно (из-за малого  $n$ ).

Т а б л и ц а 7. Значения двух синхронно зафиксированных величин

| $i$         | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9  | 10 |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| $R_i = x_i$ | 1 | 3 | 4 | 5 | 5 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 |
| $a_i = y_i$ | 3 | 1 | 3 | 2 | 5 | 3 | 3 | 6 | 7  | 5  |

Значения коэффициента корреляции:

$$-1 \leq r \leq 1; \quad |r| \leq 1. \quad (\text{VI.10})$$

При  $r \neq 0$  случайные величины  $x$  и  $y$  называются коррелированными. Независимые величины не коррелированы и для них  $|r| = 0$ , однако равенство нулю не означает, что случайные величины независимы: они независимы линейно. При  $|r| = 1$  связь между  $x$  и  $y$  функциональная. При  $|r| \geq 0,5$  связь сильная. В частности, для рассмотренных процессов  $R$  и  $a$  значения  $|r|$  получаются в пределах 0,3...0,4. При сильной связи

и достаточной точности  $r$  можно говорить о закономерной связи явлений, если это не противоречит сущности явления [18], но о силе связи лучше судить по нижней границе коэффициента, т. е. по  $r-3m_r$ . Если нижняя граница мала, то нет оснований считать величины, связанными линейно.

*Корреляционное отношение*  $\eta_{xy}$  или  $\eta_{yx}$  характеризует нелинейные связи двух случайных величин, служит показателем, аналогичным  $r$  и изменяющимся в пределах от 0 до 1. Равенство  $\eta_{xy}=0$  не означает, что и  $\eta_{yx}=0$ . При линейной зависимости  $\eta_{xy}=|r|$ .

Обратимся к примеру простой линейной регрессии. Положим, что исследователь имеет данные, представленные на рисунке 20. Теоретические линии регрессии, или отклика,  $y$  на  $x$  и  $x$  на  $y$  являются прямыми вида.

$$y-b=C_{yx}(x-a); \quad x-a=C_{xy}(y-b). \quad (\text{VI.11})$$

Задача регрессионного анализа заключается в определении оценок параметров,  $a$ ,  $b$  и  $C_{yx}$ ,  $C_{xy}$ , их дисперсий  $s^2_a$ ,  $s^2_b$ ,  $s^2_{cyx}$ ,  $s^2_{cxy}$  и оценок отклонений эмпирических данных от теоретической прямой регрессии, выраженных через  $s^2_{y|x_0}$  или  $s^2_{x|y_0}$  (дисперсии разброса значений  $y$  при фиксированном значении  $x=x_0$  или разброса значений  $x$  при  $y=y_0$ ).

Коэффициенты  $C_{yx}$  и  $C_{xy}$  являются коэффициентами регрессии (отклика)  $y$  на  $x$  и  $x$  на  $y$ , вычисляемые как

$$C_{yx}=rs_y/s_x; \quad C_{xy}=rs_x/s_y. \quad (\text{VI.12})$$

При простой линейной регрессии часто приходится проверять статистические гипотезы о линейности связи, о равенстве  $a$ ,  $b$  и  $C_{yx}$ ,  $C_{xy}$  конкретным числам (0; 1; 2), что имеет смысл при рационализации эмпирических формул (см. с. 215) или о равенстве их значений значениям параметров другой линии регрессии.

Поиск оценок параметров (VI.11) ведется методом наименьших квадратов, базирующимся на принципе максимума правдоподобия,— наиболее вероятное (правдоподобное) положение линии регрессии соответствует минимуму суммы квадратов отклонений от нее опытных точек. Метод точен, но, используя его, необходимо заранее знать вид зависимости, параметры которой отыскивают (вопрос о выборе вида зависимости рассмотрен в параграфе 5 этой главы), метод сложен и трудоемок.



Корреляционный анализ с использованием этого метода доводится до конца для идеальной модели, определяемой следующими условиями: рассматриваемая зависимость линейная; ошибки измерений  $y_i$  независимы и нормально распределены с одинаковой дисперсией  $\sigma_y$  при всех  $i$ ; ошибки измерений  $x_i$  равны нулю или очень малы по сравнению с  $\sigma_y$ .

Решить задачу регрессионного анализа, а также проверить указанные выше гипотезы, при имеющихся опытных данных, соответствующих идеальной модели, относительно просто, даже используя «ручной» счет [8, 64 и др.], как это сделано в примере VI.9. В противном случае, судя по доступным практическим руководствам, можно только найти точечные оценки параметров линии регрессии (линейной и нелинейной) и иногда, вычислив значения функции, затем оценить отклонения от нее опытных точек, но и эти результаты имеют большое значение для исследования.

Во многих случаях с помощью алгебраических преобразований удастся сделать полученные данные более пригодными для обработки. Рекомендуется нелинейную зависимость исследовать на небольших интервалах изменения  $x$ , приближенно считая ее линейной [36]. Нелинейную зависимость можно преобразовать в линейную путем замены переменных или координат (см. параграф 5 этой главы), однако следует учитывать, что ошибка измерений новых переменных тоже изменяется. Во многих случаях ошибки измерений  $y_i$  оказываются пропорциональными значениям  $y_i$ , и можно найти преобразование, стабилизирующее дисперсию. Например, для зависимости вида  $y = ae^{bx}$  при постоянстве отношения  $\sigma_i/y_i$  логарифмирование выравнивает ее и стабилизирует дисперсию. При исследовании зависимости тормозного пути  $S_T$  от скорости движения  $v_T$ , которая имеет вид  $S_T = av_T^2$ , этого можно достигнуть переходом к зависимости  $\sqrt{S_T} = f(v_T)$ .

Оценка параметров по методу наименьших квадратов показывает, что в уравнении (VI.11) значения  $a = \bar{X}$ ,  $b = \bar{Y}$ ,  $s_x$ ,  $s_y$  рассчитывают по (IV.4),  $r$  — по (VI.8), если модель идеальна.

Для вычисления ошибок параметров полученной прямой регрессии  $y$  на  $x$  используется сумма квадратов отклонений измеренных значений  $y_i$  от рассчитан-

и достаточной точности  $r$  можно говорить о закономерной связи явлений, если это не противоречит сущности явления [18], но о силе связи лучше судить по нижней границе коэффициента, т. е. по  $r - 3m_r$ . Если нижняя граница мала, то нет оснований считать величины, связанными линейно.

*Корреляционное отношение*  $\eta_{xy}$  или  $\eta_{yx}$  характеризует нелинейные связи двух случайных величин, служит показателем, аналогичным  $r$  и изменяющимся в пределах от 0 до 1. Равенство  $\eta_{xy} = 0$  не означает, что и  $\eta_{yx} = 0$ . При линейной зависимости  $\eta_{xy} = |r|$ .

Обратимся к примеру простой линейной регрессии. Положим, что исследователь имеет данные, представленные на рисунке 20. Теоретические линии регрессии, или отклика,  $y$  на  $x$  и  $x$  на  $y$  являются прямыми вида.

$$y - b = C_{yx}(x - a); \quad x - a = C_{xy}(y - b). \quad (\text{VI.11})$$

Задача регрессионного анализа заключается в определении оценок параметров,  $a$ ,  $b$  и  $C_{yx}$ ,  $C_{xy}$ , их дисперсий  $s^2_a$ ,  $s^2_b$ ,  $s^2_{C_{yx}}$ ,  $s^2_{C_{xy}}$  и оценок отклонений эмпирических данных от теоретической прямой регрессии, выраженных через  $s^2_{y|x_0}$  или  $s^2_{x|y_0}$  (дисперсии разброса значений  $y$  при фиксированном значении  $x = x_0$  или разброса значений  $x$  при  $y = y_0$ ).

Коэффициенты  $C_{yx}$  и  $C_{xy}$  являются коэффициентами регрессии (отклика)  $y$  на  $x$  и  $x$  на  $y$ , вычисляемые как

$$C_{yx} = rs_y/s_x; \quad C_{xy} = rs_x/s_y. \quad (\text{VI.12})$$

При простой линейной регрессии часто приходится проверять статистические гипотезы о линейности связи, о равенстве  $a$ ,  $b$  и  $C_{yx}$ ,  $C_{xy}$  конкретным числам (0; 1; 2), что имеет смысл при рационализации эмпирических формул (см. с. 215) или о равенстве их значений значениям параметров другой линии регрессии.

Поиск оценок параметров (VI.11) ведется методом наименьших квадратов, базирующимся на принципе максимума правдоподобия, — наиболее вероятное (правдоподобное) положение линии регрессии соответствует минимуму суммы квадратов отклонений от нее опытных точек. Метод точен, но, используя его, необходимо заранее знать вид зависимости, параметры которой отыскивают (вопрос о выборе вида зависимости рассмотрен в параграфе 5 этой главы), метод сложен и трудоемок.

Корреляционный анализ с использованием этого метода доводится до конца для идеальной модели, определяемой следующими условиями: рассматриваемая зависимость линейная; ошибки измерений  $y_i$  независимы и нормально распределены с одинаковой дисперсией  $\sigma_y$  при всех  $i$ ; ошибки измерений  $x_i$  равны нулю или очень малы по сравнению с  $\sigma_y$ .

Решить задачу регрессионного анализа, а также проверить указанные выше гипотезы, при имеющихся опытных данных, соответствующих идеальной модели, относительно просто, даже используя «ручной» счет [8, 64 и др.], как это сделано в примере VI.9. В противном случае, судя по доступным практическим руководствам, можно только найти точечные оценки параметров линии регрессии (линейной и нелинейной) и иногда, вычислив значения функции, затем оценить отклонения от нее опытных точек, но и эти результаты имеют большое значение для исследования.

Во многих случаях с помощью алгебраических преобразований удастся сделать полученные данные более пригодными для обработки. Рекомендуется нелинейную зависимость исследовать на небольших интервалах изменения  $x$ , приближенно считая ее линейной [36]. Нелинейную зависимость можно преобразовать в линейную путем замены переменных или координат (см. параграф 5 этой главы), однако следует учитывать, что ошибка измерений новых переменных тоже изменяется. Во многих случаях ошибки измерений  $y_i$  оказываются пропорциональными значениям  $y_i$ , и можно найти преобразование, стабилизирующее дисперсию. Например, для зависимости вида  $y = ae^{bx}$  при постоянстве отношения  $\sigma_i/y_i$  логарифмирование выравнивает ее и стабилизирует дисперсию. При исследовании зависимости тормозного пути  $S_T$  от скорости движения  $v_T$ , которая имеет вид  $S_T = av_T^2$ , этого можно достигнуть переходом к зависимости  $\sqrt{S_T} = f(v_T)$ .

Оценка параметров по методу наименьших квадратов показывает, что в уравнении (VI.11) значения  $a = \bar{X}$ ,  $b = \bar{Y}$ ,  $s_x$ ,  $s_y$  рассчитывают по (IV.4),  $r$  — по (VI.8), если модель идеальна.

Для вычисления ошибок параметров полученной прямой регрессии  $y$  на  $x$  используется сумма квадратов отклонений измеренных значений  $y_i$  от рассчитан-

ных по уравнению. Для идеальной модели это сумма квадратов

$$S = \sum_{i=1}^n \left[ y_i - \bar{y} - r \frac{s_y}{s_x} (x_i - \bar{x}) \right]^2 = (n-1) s_y^2 (1-r^2). \quad (\text{VI.13})$$

Дисперсии оценок параметров (для идеальной модели):

$$\begin{aligned} s_b^2 &= \frac{S}{(n-2)n}; \quad s_{cyx}^2 = \frac{S}{s_x^2(n-1)(n-2)}; \\ s_{y|x_0}^2 &= \frac{s_x^2(n-1) + n(x_0 - \bar{x})^2}{s_x^2(n-1)(n-2)}. \end{aligned} \quad (\text{VI.14})$$

Ошибки параметров определяют по (IV.10) при  $k=n-2$ .

**Пример VI.9.** Допустим, что данные таблицы 7 в примере VI.8 и на рисунке 20 соответствуют идеальной модели и представляют собой в каком-то масштабе часть зависимости выработки трактора с начала эксплуатации от его времени пребывания в хозяйстве. Эта выработка зависит от оснащенности хозяйства техникой, квалификации механизаторов, отрасли хозяйства, в которой занят трактор, и т. д. Получается типичная корреляционная зависимость.

В данном случае уравнение регрессии  $y$  на  $x$ :

$$y - b = C_{yx}(x - a); \quad y = 3,8 + 0,424(x - 6,2).$$

При  $r=0,56$  (из примера VI.8);  $s_x^2=9,33$ ;  $s_y^2=5,51$  получено:  $S=34$ ,  $s_b=0,65$ ;  $s_{cyx}=0,23$ ; при  $x=x_0=3$  значение  $y=2,44$ ;  $s_{y|x_0}=0,527$ . При  $H=0,95$  и  $k=n-2=8$  коэффициент в (IV.10)  $t_{H,k}=2,31$ . Получим интервальные оценки:  $b=2,3...5,3$ ;  $C_{yx}=-0,106...0,954$ ;  $\bar{y}=f(3)=1,22...3,66$ . Как видно, разброс значений параметров и функции очень большой, что и следовало ожидать при  $r=0,56$  с  $m_r=0,22$ .

Рассмотренный анализ для исключения резко отклоняющихся от кривой точек дает статистический критерий, аналогичный (VI.6) для ряда измерений [64, с. 121].

Анализируя выражения (VI.11), можно заметить, что они необратимы. Например, по  $y=f(x)$  нельзя найти значение  $x$ , соответствующее определенному значению  $y$ . Иногда же в сложные аналитические выражения, подвергающиеся затем различным преобразованиям, приходится включать простые зависимости типа  $C=C_0+C_1N_e$  или  $M=M_0+M_1G$  ( $C$  и  $M$  — цена и масса машины;  $C_0$ ,  $C_1$  и  $M_0$ ,  $M_1$  — постоянные коэффициенты;  $N_e$  и  $G$  — мощность двигателя и грузоподъем-

ность машины), которые являются корреляционными. С таким положением приходится сталкиваться, например, при обосновании типажа некоторых машин по критерию, допустим, приведенных затрат. Ошибки анализа в данном случае практически не определимы, но можно попытаться сравнить расчетные и фактические данные для конкретных машин и условий эксплуатации.

Следует помнить, что корреляция — чисто математический прием, как и все методы статистического анализа, не вскрывающий сущность явления. Такая чисто числовая оценка связей часто бывает формальной, показывающей поверхность явления. Но корреляция иногда может показать наличие нескрытой функциональной связи и помочь оценить функциональную связь, полученную по опытным данным.

**Характеристики стационарных случайных процессов.** Вычисление и анализ корреляционных функций  $\rho_x(\tau)$ ,  $R_x(\tau)$  и спектральных плотностей  $\sigma_x(\omega)$ ,  $S_x(\omega)$  процессов (см. главу III, параграф 3) и является основной задачей обработки и анализа экспериментальных данных при исследовании динамики объектов (машин, агрегатов) и их систем регулирования статистическими методами.

Рассмотрим сущность этих характеристик. Возьмем в таблице 7 строку ординат процесса  $a$ , снятых с интервалом  $\Delta=0,1$  с и по методике примера VI.8 рассчитаем коэффициент корреляции  $\rho_i=\rho_0$  по парам значений  $x_i=a_i$  и  $y_i=a_i$ , т. е. по парам  $a_1$  и  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_2$  и т. д. до  $a_N$ . Очевидно,  $\rho_0=1$ , так как  $a_i=a_i$ . Рассчитаем  $\rho_i=\rho_1$  по парам  $a_i$  и  $a_{i+1}$  ( $a_1$  и  $a_2$ ,  $a_2$  и  $a_3$  и т. д.). Допустим,  $\rho_1=0,98$  — связь между ординатами  $a_i$  и  $a_{i+1}$  очень тесная и  $a_i \approx a_{i+1}$ . Для пар  $a_i$  и  $a_{i+2}$  ( $a_1$  и  $a_3$ ,  $a_2$  и  $a_4$  и т. д.) получим, допустим,  $\rho_2=0,96$ , вывод тот же:  $a_i \approx a_{i+2}$ .

*Нормированная корреляционная функция*  $\rho(\tau)$  есть зависимость коэффициента корреляции ординат, разделенных интервалом  $\tau_j=j\Delta$ , от размера этого интервала. Если связь между ординатами при достаточно большом  $\tau$  тесная (можно, зная ординату в момент времени  $t$ , с большой вероятностью предсказать узкий интервал, в котором находится значение ординаты в момент  $t+\tau$ ), то процесс, видимо, мало изменчив и случайность его невелика. Противоположный вывод

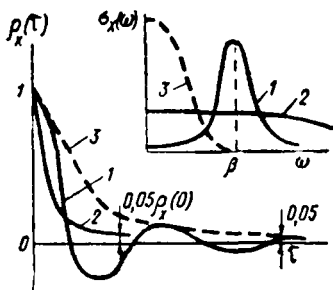


Рис. 21. Нормированные корреляционные функции  $\rho_x(\tau)$  и спектральные плотности  $\sigma_x(\omega)$ , соответствующие:  
 1 — (VI.17), 2 — (VI.16);  $\alpha_1 < \alpha_2$ ,  
 штриховой линией показана (VI.16)  
 при  $\alpha = \alpha_1$ .

$= \sigma_x^2 \rho_x(\tau)$  будет более общей характеристикой, чем  $\rho_x(\tau)$ , так как она учитывает и дисперсию процесса  $\sigma_x^2 = D_x$ . Значение  $\tau$ , при котором  $\rho_x(\tau) = 0,05$ , называется временем корреляции.

Таким образом, корреляционная функция характеризует случайность и изменчивость стационарного случайного процесса — судить об этом можно по скорости ее затухания (приближения к нулю) и дисперсии процесса.

Если для процесса  $x(t)$ , состоящего из двух почти не случайных синусоид  $A_1 \sin \omega_1 t$  и  $A_2 \sin \omega_2 t$  (причем  $\omega_1$  случайно изменяется в интервале  $\beta_1 \pm \Delta\omega$ , а  $\omega_2$  в интервале  $\beta_2 \pm \Delta\omega$  и  $\beta_1 \ll \beta_2$ ) построить кривую спектральной плотности  $S_x(\omega)$ , то она будет иметь два максимума (на кривой 1 рисунка 21 он один) при  $\omega = \beta_1$  и  $\omega = \beta_2$ , а общая площадь под кривой  $F = \int_0^\infty S_x(\omega) d\omega = D_x$  и разделится на две части  $F_1 = D_{x1}$  и  $F_2 = D_{x2}$ , сосредоточенные над интервалами  $\omega = \beta_1 \pm \Delta\omega$  и  $\omega = \beta_2 \pm \Delta\omega$ , причем  $\sigma_{x1} \approx 2A/6$  и  $\sigma_{x2} \approx 2A/6$ .

Нормированная спектральная плотность  $\sigma_x(\omega) = S_x(\omega)/\sigma_x^2$ . Отметим, что на кривой 3 (рис. 21)  $\sigma_x(\omega)$  сосредоточена у  $\omega = 0$ , т. е. в области колебаний с большими периодами (на кривых, соответствующих работе машин в поле, часто  $T_{\max} \geq 10$  м) и, видимо, левая часть кривой  $\sigma_x(\omega)$  сливается с осью  $\sigma_x(\omega)$ . Таким

следует сделать о процессе, в котором уже при  $\tau = \Delta$  значение  $\rho_1 = 0,1$  и  $\rho_i < 0,1$  при  $j > 1$ . На рисунке 21 кривая 2 соответствует более изменчивому процессу, чем кривая 1. Если процесс имеет почти неслучайную периодическую составляющую, т. е.  $x = C + A \sin \omega_1 t$ , где  $C$ ,  $\omega_1$  — случайные величины, зависящие от  $t$ , то она проявится на  $\rho_x(\tau)$  (рис. 21, кривая 1). Тогда  $\rho_x(\tau_j) \approx \rho_j \cos \omega_1 \tau_j$ . Корреляционная функция  $R_x(\tau) =$

образом, спектральная плотность показывает, колебания каких случайных частот преобладают в процессе и какая часть общей дисперсии формируется за счет случайных амплитуд колебаний этих частот.

По кривым 2 и 3 (рис. 21) видно, чем медленнее затухает  $\rho(\tau)$ , тем уже спектр частот ( $\omega_{\max} - \omega_{\min}$ ) процесса. Хорошо это заметно на «предельных» случайных процессах, используемых в теории. Синусоида  $x = \sin \omega_1 t$  имеет незатухающую кривую  $\rho_x(\tau) = \cos \omega_1 \tau$  и  $\sigma_x(\omega) = \infty$  при  $\omega = \omega_1$  и  $\sigma_x(\omega) = 0$ , когда  $\omega \neq \omega_1$ , причем  $\int_0^{\infty} \sigma_x(\omega) d\omega = 1$  ( $\sigma_x(\omega)$  представляет  $\delta$ -функцию). «Белый шум» содержит колебания всех частот, в одинаковой мере участвующих в формировании дисперсии, в этом случае  $\rho_x(\tau) = 1$  при  $\tau = 0$  и  $\rho_x(\tau) = 0$  при  $\tau \neq 0$ , а  $\sigma_x(\omega) = \text{const}$ .

Сущность взаимных корреляционных функций  $\rho_{xy}(\tau)$ ,  $R_{xy}(\tau)$  и спектральных плотностей  $\sigma_{xy}(\omega)$ ,  $S_{xy}(\omega)$  можно пояснить аналогично, правда,  $S_{xy}(\omega)$  сложнее  $S_x(\omega)$  — это функция комплексного переменного.

Точность вычисления значений  $\rho_x(\tau)$  и  $\rho_{xy}(\tau)$  определяется по очень сложным формулам и представляет собой тоже функцию от  $\tau$  (и от  $\Delta$ , и  $N$  — числа ординат) [21, 42, 48, 49]. Точность эта падает с ростом  $\tau$ . Интервал  $\Delta$  выбирают, а  $\tau_{\max}$  ограничивают, по условиям:

$$\Delta = \frac{1}{20f_{\max}}; \quad |R(\tau_{\max})| \leq 0,05 |R(0)|, \quad (\text{VI.15})$$

где  $f_{\max}$  — высшая учитываемая частота в спектре процесса  $x(t)$ .

В рассматриваемых исследованиях точность расчета  $\rho(\tau)$  обеспечивают рекомендуемым выбором времени или пути фиксации процесса  $T$  и  $\Delta$ ,  $\tau_{\max}$  без очень трудоемкого даже для ЭВМ расчета функции ошибки. В литературе приведены схемы ряда корреляторов, позволяющих получить  $R_x(\tau)$  и  $R_{xy}(\tau)$  при обработке осциллограмм без снятия ординат.

Спектральные плотности процессов рассчитывают на ЭВМ или находят по выражениям, аппроксимирующим корреляционные функции. При работе навесных агрегатов, например, для многих процессов [48, 49]:

$$\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}; \quad \sigma_x(\omega) = \frac{2\alpha}{\pi(\alpha^2 + \omega^2)}; \quad (\text{VI.16})$$

$$\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau; \quad \sigma_x(\omega) = \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2)^2 - 4\alpha^2\omega^2} \quad (\text{VI.17})$$

где  $\alpha$  характеризует интенсивность затухания корреляционной функции (чем беспорядочнее процесс, тем больше  $\alpha$ );  $\beta$  характеризует частоту периодической составляющей (рис. 21).

Отметим, что выражения (VI.16 и VI.17) соответствуют недифференцируемым процессам, которые практически не встречаются при работе сельскохозяйственных агрегатов, но они просты. При необходимости определения дисперсии скорости или ускорения процесса, например, в теории выбросов случайных функций (при определении, допустим, количества превышений определенного уровня допуска на глубину обработки в единицу времени и продолжительности этих превышений)  $R_x(\tau)$  аппроксимируется другими выражениями [48, 49, 67]. Опыт показывает, что аппроксимацию целесообразно выполнять после расчета на ЭВМ и  $R_x(\tau)$ , и  $S_x(\omega)$  — это позволяет полнее учесть особенности обеих характеристик.

Методы расчета  $S_x(\omega)$  в общем виде при использовании спектральных анализаторов изложены в ряде работ, все они предполагают использование ЭВМ. Общие вопросы расчета и анализа функций  $R_x(\tau)$ ,  $R_{xy}(\tau)$ ,  $S_x(\omega)$ ,  $S_{xy}(\omega)$  с примерами изложены в источниках [21, 67], оценки точности их расчета рассмотрены там же и в [42]. Методы подготовки осциллограмм, получения и анализа этих характеристик при исследовании сельскохозяйственных агрегатов с разбором многих примеров даны в [48, 49] (см. также с. 182).

*В заключение отметим следующие моменты.* Полезность статистических методов подтверждается большим числом практических применений. Однако большинство из методов было выведено в предположении, что удовлетворяются некоторые точно определенные предпосылки (условия). При использовании метода предполагается, что реальные условия несильно отличаются от идеальных: те и другие и допустимое их расхождение исследователь должен четко себе представлять. Помочь в этом может консультация со статистиком.

В каждом случае необходимо точно определить совокупность (дать ее характеристику и условия существования), из которой получены наблюдения, и помнить,



что все выводы, которые можно получить по данной выборке, относятся только к данной совокупности.

Большая часть расчетных формул и приемов для оценки параметров и критериев дают достаточно точные результаты при ограниченных снизу количествах измерений или опытов (например,  $n \geq 50$ ), причем в разных руководствах даны разные рекомендации — их необходимо оценить с позиции решения своих задач.

Используемые при анализе статистические таблицы могут быть составлены по разному принципу, поэтому, прежде чем ими пользоваться, следует разобраться в них по примерам в тексте или по пояснениям к таблицам (при отсутствии навыков работы с ними), или по существу применяемых критериев. Одни таблицы, например, составлены для значений вероятности  $\alpha$ , другие — для  $1-\alpha$ .

Отметим также, что большинство критических статистик (критериев) применимо для ограниченного перечня гипотез или для гипотез, соответствующих ограниченному перечню законов распределения. Все статистические критерии требуют, чтобы изучаемые случайные величины были распределены по нормальному закону. При нарушении этого требования (наличии большой асимметрии или эксцесса) некоторые критерии сохраняют «работоспособность», являются устойчивыми, другие нет. Это требует в ответственных случаях тщательной проверки закона распределения. Более подробные сведения об этом можно найти в литературе [8, 33, 52, 79].

Из многих работ, посвященных использованию статистических методов при исследованиях и испытаниях сельскохозяйственных машин и агрегатов, следует выделить книги А. Б. Лурье [49] и А. Л. Миткова, С. В. Кардашевского [52] (обе содержат обширную библиографию по статистическим методам).

Проверка статистических гипотез с примерами изложена в работах [33, 42, 52, 64]; планирование опытов для их проверки — в [33, 42]. Хорошо представлен критерий  $\chi^2$  в [19, 52, 78]. Дисперсионный анализ освещен в той или иной мере с примерами в [8, 27, 30, 33, 42, 79]. Различные задачи и методы регрессионного и корреляционного анализа рассмотрены в [8, 19, 27, 31, 64]. Статистические таблицы имеются практически во всех указанных выше источниках, а также в [7].

## 5. Сглаживание опытных зависимостей

**Обоснования возможности сглаживания.** При хорошо контролируемом эксперименте с достаточным количеством измерений, к которому и стремится исследователь, получают функциональные (точнее, практически функциональные) зависимости.

На построенном по опытным точкам графике функциональной зависимости привлекает внимание разброс точек, неплавность или ломанность линий, их соединяющих. Общей же для большинства зависимостей чертой будет плавность изменения функции, а неплавность опытной кривой обусловлена случайными ошибками измерений. Это положение является физической основой «исправления» опытных данных или сглаживания экспериментальных зависимостей — замены одной совокупности опытных точек другой совокупностью близких к ним точек, лежащих на достаточно гладкой кривой. Цель сглаживания — устранение «шума» эксперимента. Оно уточняет в какой-то мере результаты опыта и необходимо для обеспечения точности результатов, полученных при анализе опытных функциональных зависимостей и при их преобразованиях.

Всегда следует помнить, что «гладкость» зависимостей — общая черта большинства, но не всех закономерностей. Поэтому перед сглаживанием следует уточнить физический смысл зависимости. Изломы могут быть следствием естественных закономерностей. Зависимость твердости или прочности многокомпонентного сплава от температуры явно будет неплавной кривой или ломаной линией. В таком случае следует не сглаживать зависимость, а искать точки излома, проводя новые серии опытов. Аналогичны данные исследований износа многослойных рабочих органов, потока жидкости в области перехода от ламинарного к турбулентному, характеристик двигателя и т. п. Амплитудно-частотная характеристика пахотного агрегата, например, выглядит очень «негладкой» (рис. 22) кривой. Но именно она определяет частоту и амплитуду изменения нагрузки на опорном колесе плуга.

Причиной излома может быть измерительная аппаратура. Например, некоторые потенциометры имеют разные масштабы по длине. Здесь требуется не сглаживание, а исправление данных.

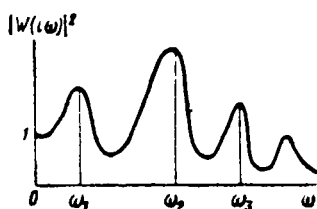


Рис. 22. Амплитудно-частотная характеристика пахотного агрегата.

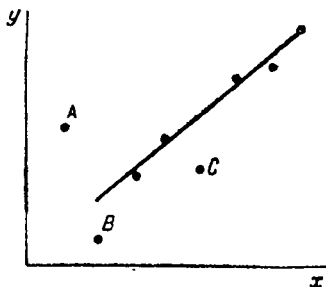


Рис. 23. Отклонения опытных точек от опытной зависимости.

При любом способе сглаживания не должна искажаться физическая сущность явления. При большом количестве измерений (их высокой точности) и малых интервалах сглаживание почти не искажает ее. При малом количестве измерений и больших интервалах следует особое внимание уделять учету этой сущности.

Сглаживание кривой, получаемой в результате расчета по формулам, недопустимо без предварительного сглаживания кривых непосредственных измерений. Например, при построении тяговой характеристики трактора зависимости  $N_{кр} = f(P_{кр}) = P_{кр} v_p$  и  $g_{кр} = f_1(P_{кр}) = G_T / N_{кр}$  определяют только по предварительно сглаженным зависимостям  $v_p = f_2(P_{кр})$  и  $G_T = f_3(P_{кр})$ . В противном случае характеристики трактора могут быть искажены. Поэтому на кривых типа  $N_{кр}$  и  $g_{кр}$  не отмечают опытные точки.

После сглаживания следует сохранять первоначальные таблицы и графики, являющиеся документами определенного этапа исследования.

**Исключение резко отклоняющихся точек.** При сглаживании решается вопрос об опытных точках, резко отклоняющихся от прямых, плавных кривых или теоретических зависимостей. При необходимости такие точки мы склонны считать промахом и исключать, заменив их значения найденными путем интерполяции. Рассматривая отклонения, следует делать различие между средними и крайними точками (рис. 23)— к их изучению требуется разный подход. Отклоняющуюся точку С в середине графика после проверки по подходящему критерию следует исключить. Крайние же

точки *A* или *B* могут быть началом нового участка кривой, и при их исключении можно потерять важную информацию. Пока в области малых (для данного примера) значений не будут получены дополнительные данные, точки *A* или *B* исключать с использованием формальных приемов не следует.

Причиной резкого отклонения опытной точки от гладкой кривой, кроме указанных в параграфе 6 главы IV, может быть неудовлетворительная нейтрализация внешних факторов (давления воздуха, тока в сети, характеристик почвы и т. д.).

Обоснование исключения промаха начинается с проверки опытных данных. Прежде всего проверяют данные, полученные в разных повторностях опыта — при правильной методике проведения эксперимента резкое отклонение обычно вызывается резким отличием результата одной повторности (во всех повторностях это маловероятно). Этот результат может быть исключен статистическими методами (с. 190).

Найти причину промаха позволяет иногда проверка результатов измерений внешних переменных, контроль которых предусмотрен методикой. Часто в данном случае это не промах в измерении, а «промах» в выборе условий опытов (например, делянок, на которых исследуется пахотный агрегат). Если резко отклоняющийся результат соответствует резкому изменению внешнего фактора, то его следует исключить.

Явную неисправность прибора можно заметить, когда при рандомизированном плане точки, полученные в определенной части опытов определенного дня, резко отклонены на разных графиках, тогда можно ожидать, что измерения были выполнены неправильно и эти точки можно исключить. Кстати говоря, это можно заметить, проверяя аппаратуру по окончании серии опытов, как предусмотрено методикой (правда, не всю ее можно проверить — тахометр, например, нельзя).

Если причины отклонения опытной точки в середине графика, а иногда и на его концах не найдены, то при ее исключении как промаха используют следующие критерии: нарушение баланса сверх установленной нормы при контроле по уравнению баланса (см. с. 176); противоречие гипотезе или теории, когда они достаточно полно раскрывают физическую сущность явления; вероятность получения зафиксированного отклонения, ко-

торая определяется методами регрессионного анализа [64, с. 121] (последний критерий для точек  $A$  и  $B$  непригоден). Если же причина отклонения не вскрыта и ни один из критериев не позволяет исключить отклонившуюся точку, то опыт следует повторить.

**Методы сглаживания.** В соответствии со способами представления зависимостей методы сглаживания могут быть графическими, табличными и математическими (аналитическими). Все они могут базироваться на фундаментальном методе сглаживания — методе наименьших квадратов (см. с. 198). При всех методах сглаживания первым шагом будет определение вида опытной зависимости: прямая  $y=a+bx$ , парабола  $y=a+cx^2$  и т. д. Иногда он известен из теории, порой не требуется строгого определения и выбирают многочлен подходящей степени. Вопросы выбора вида зависимости рассмотрены далее, здесь же предполагается, что он известен.

С принципиальных позиций *графическое сглаживание* представляет собой проведение с помощью линейки и лекал плавной линии по опытным точкам, табличное — уточнение по определенным формулам значения функции в каждой точке с учетом значений ее в соседних точках и общего вида зависимости, математическое — уточнение значений функции в каждой точке путем их расчета по предварительно найденной с этой целью формуле зависимости.

*Графическое сглаживание* наиболее просто и наглядно, универсально, так как оно не содержит принципиальных ошибок некоторых табличных и математических методов (например, сглаживание непараболической кривой параболой). Обычно графическое сглаживание предшествует математическому или они используются совместно.

При графическом сглаживании целесообразно использовать прямую линию, преобразовывая при необходимости опытные данные (выравнивая опытную зависимость). Проводить линию через все точки не обязательно (если удастся провести через все, очевидно, сглаживание не требуется). Но при этом следует соблюдать следующие требования к сглаживающей линии (рис. 24, 25): суммы отрезков нормалей, опущенных на кривую из опытных точек, и суммы площадей, заключенных между ломаной линией и плавной кривой

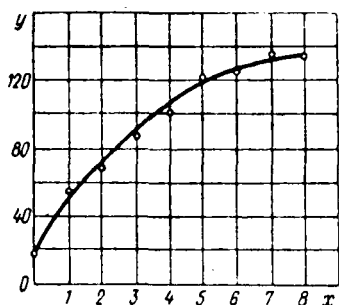


Рис. 24. Графическое сглаживание опытной зависимости (к примеру VI.11).

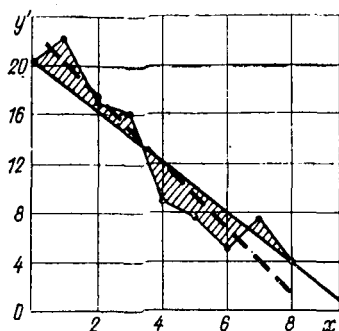


Рис. 25. Графическое сглаживание опытной зависимости (к примеру VI.11).

сверху и снизу, (с разными знаками соответственно) должны быть равны нулю, а сумма абсолютных величин этих нормалей и площадей должна быть минимальной.

*Табличное сглаживание* применимо, когда опытных точек много, выбор вида зависимости затруднен, а в задачи анализа, например дифференцирование, не входит использование единой формулы для всех данных — требуется лишь устранить «шум» эксперимента. В литературе [64] отмечается, что результаты такого сглаживания в большой степени зависят от принятого вида зависимости, выбор которой подсказывается скорее интуицией, чем каким-либо правилом. Преимущество табличного сглаживания перед графическим — возможность использования ЭВМ с определением степени приближения к опытной зависимости.

*Математическое сглаживание* наиболее эффективно, так как, используя формулы, легко решать разные задачи анализа опытных данных, но оно связано с довольно сложными трудоемкими приемами и методами аппроксимации опытных зависимостей.

Методы графического сглаживания в литературе [18, 36, 78 и др.], табличного в [18, 42, 64 и др.].

**Выбор вида опытной зависимости.** При корреляционном и регрессионном анализе, сглаживании опытных зависимостей, выражении их формулами и в других случаях необходимо знать или обоснованно выбирать вид опытной зависимости или соответствующую ей формулу.

Вид зависимости часто легко определить однозначно, если располагать математической моделью явления, отражающей его физическую сущность. В противном случае имеющиеся таблицы и графики можно представить формулами разных типов, из которых необходимо выбрать один. Этот выбор — главный шаг, определяющий результативность и точность эмпирической формулы.

При изучении сущности явления необходимо выбрать тот тип формул, который наиболее соответствует физическому смыслу, а формула может быть превращена в рациональную. Например, исследуя зависимость производительности транспорта от его грузоподъемности, опытные данные можно представить многочленом или гиперболой, однако простые рассуждения с выходом за пределы рассмотренных значений аргумента (проверка на бесконечность) покажут, что многочлен не отражает сущности зависимости.

Если устанавливают чисто количественные взаимосвязи, то целесообразен выбор простой формулы (проще определять ее параметры и удобнее использовать в дальнейшем), но упрощение не должно касаться физического смысла и точности. Иногда приходится упрощать известные формулы (выполнять их математическое сглаживание), если при анализе их подставляют в более общие.

Часто при недостаточно известной сущности явления перебирают ряд подходящих формул и выбирают наиболее точную, так как по характеру изменения разные функции на отдельных участках нельзя отличить, например функции  $y=ax^b$  и  $y=ae^{bx}$ ;  $y=1/(a+bx)$  и  $y=a+bx+cx^2$ . Подбор формул ведется разными способами: определяют параметры подходящих формул методом наименьших квадратов, вычисляют суммы квадратов отклонений точек от каждой из кривых и останавливаются на результате с наименьшей суммой (целесообразно при использовании ЭВМ); выбирают подходящие формулы, выравнивают в соответствии с ними опытные данные, наносят точки выровненных зависимостей на график и находят зависимость с наименьшим отклонением точек от прямой (графический метод). Возможна также проверка соответствия формулы опытным данным по критерию Фишера  $F$  и сравнение точности разных формул по корреляционно-

му отношению или выбор оптимальной степени многочлена и тригонометрического полинома, сглаживающих опытные (и сложные аналитические) зависимости [42, 64]; простой прием выбора между показательной и степенной функциями изложен в работе [64, с. 101]; помогают в выборе вида зависимости наборы типовых кривых [18 и др.].

В инженерной практике наиболее широкое распространение получил графический метод с выравниванием опытных зависимостей. *Выравнивание зависимости — преобразование опытных данных или координат зависимости так, чтобы зависимость на графике представляла прямую линию.* Например, если данные представляют гиперболу  $y=1/(a+bx)$  в линейных координатах, то  $1/y=a+bx$  — прямая в тех же координатах (см. табл. 8). Выравнивание корреляционных зависимостей выполняется по  $x$  и  $y$ , соответствующим средневзвешенным их значениям для отдельных классов.

Широко используется выравнивание при экстраполяции, например, для проверки опытных данных и теоретических положений путем экстраполяции прямых на бесконечность или нуль; кривые мало для этого пригодны (см. параграф 7 этой главы).

Рекомендуется прибегать к этому способу даже тогда, когда выравнивается только один участок кривой. В качестве примера рассмотрим рисунок 26, а. На графике слева трудно заметить точку перехода от одной зависимости к другой, справа она хорошо просматривается, а дополнительные опыты в окрестности этой точки уточняют ее положение (график получен при испытании устойчивости тонких стержней с целью определения области Эйлера, соответствующей прямой на рисунке 26, б). Выравнивание опытной зависимости использовано далее в примере VI.11 и показано с примерами в литературе [36, 64, 78].

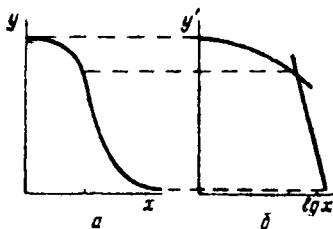


Рис. 26. Изменение вида зависимости путем замены переменной.



Таблица 8. Способы выравнивания некоторых функций

| Функции                     | Способ выравнивания              |   |
|-----------------------------|----------------------------------|---|
|                             | строится зависимость             | в координатах   |
| 1. $y = ax^b$               | $y$ от $x$<br>$\lg y$ от $\lg x$ | логарифмических<br>линейных                               |
| 2. $y = ae^{cx}$            | $y$ от $x$<br>$\lg y$ от $x$     | полулогарифмических<br>( $x$ —лин., $y$ —log)<br>линейных |
| 3. $y = \frac{1}{ax+b}$     | $1/y$ от $x$                     | линейных  |
| 4. $y = \frac{x}{ax+b}$     | $1/y$ от $1/x$                   | »   |
| 5. $y = a+bx+cx^2$          | $\frac{y-y^*}{x-x^*}$ от $x$     | »   |
| 6. $y = \frac{x}{ax+b} + c$ | $\frac{x-x^*}{y-y^*}$ от $x$     | »   |

Примечание.  $y^*$  и  $x^*$  — координаты любой точки, лежащей на сглаженной кривой.

## 6. Выражение опытных зависимостей формулами

Аппроксимация — замена одних математических объектов другими, в том или ином смысле близкими или сходными, например замена графика формулой.

Аппроксимация выполняется в целях анализа полученных зависимостей, раскрытия сущности явлений и теоретических обобщений — аналитические выражения способствуют раскрытию сущности явления, помогают найти аналогии и использовать далее следствия из них, выводы и т. д. В целях преобразования информации к

виду, удобному для дальнейшего использования — формулы упрощают ее преобразование (например, дифференцирование), позволяют конкретизировать данные для определенных условий (вычислить сопротивление данного плуга). Если эти цели не ставятся, то аппроксимация не имеет смысла.

**Рациональные и эмпирические формулы.** По степени связей зависимостей с сущностью явления их и соответствующие формулы разделяют на рациональные и эмпирические.

*Рациональные формулы* — важнейший тип формул. Их характерный признак — физический смысл каждого коэффициента и логический вывод формулы из законов физики и механики. Обычно основа рациональных формул получается при разработке гипотезы и при теоретических исследованиях. Они показывают закономерность развития явления, объясняют его, показывают факторы и связи между ними. Это формулы, выражающие общие закономерности: формула В. П. Горячкина, уравнение движения в общем виде и т. д.

*Эмпирические формулы* широко распространены в технических приложениях. Для решения исследовательских и практических задач приходится выражать зависимости в виде формул, отражающих чисто количественные отношения между факторами. Они не носят характера всеобщности и отражают развитие явления только для условий опыта. Это, например, формулы буксования в функции силы тяги, связи усилий резания резцом с глубиной, подачей и скоростью резания, формулы, получаемые в экспериментах с «черным ящиком», и т. д.

Можно подытожить сказанное: рациональные формулы получаются из теоретических соображений, эмпирические — по опытным данным, главным образом в научных областях или направлениях, не имеющих прочной теоретической базы. Выделяют иногда полуэмпирические или полурациональные формулы, которые частично учитывают физическую сущность явления и раскрывают его с какой-то стороны.

Многие эмпирические зависимости затем были рационализированы. Иногда структура формулы указывает на пути превращения ее в рациональную.

*Первые шаги по рационализации формул* намечены в [18].

**Определение параметров опытных зависимостей.** Наиболее точным методом определения параметров служит метод наименьших квадратов (далее МНК). Метод трудоемкий, но для расчетов на ЭВМ имеются стандартные программы. Ручной расчет практически используется для линейных зависимостей.

Интересно отметить свойство оценки параметров по МНК функции нескольких переменных, допустим, линейной:  $z = a + bx + cy$ . Если определить по МНК параметры  $a$ ,  $b$  и  $c$ , подставить в формулу  $y = y_0$  и получить  $z = f(x) = d + ex$ , а затем взять опытные данные, соответствующие  $y = y_0$  и определить по МНК параметры функции  $z = f_2(x) = g + hx$ , то получим  $g \neq d$ ;  $h \neq e$ . Для примера [64, с. 81]  $d = 2,367$ ;  $g = 2,440$ ;  $e = 0,487$ ;  $h = 0,540$  — разности  $d - g$  и  $e - h$  составляют  $0,03d$  и  $0,11e$ . При анализе опытных данных это необходимо учитывать.

Техника применения МНК громоздка для изложения, с ней можно ознакомиться в литературе. Здесь отметим лишь важность учета равноточности измерений. Метод наиболее доступно изложен в работах [19, 25], в [19] показано упрощенное графическое решение, рекомендации по упрощению метода при исследованиях технических систем даны в [78], расчетные формулы для разных методов, базирующихся на МНК (с использованием многочленов Чебышева, тригонометрических полиномов) представлены в источниках [42, 64, 69] и другой распространенной литературе. Часто используются упрощенные методы. Наиболее просты они для определения прямой, которая отыскивается в виде

$$y = a + bx. \quad (\text{VI.18})$$

*Способ избранных точек.* На сглаженной (например, методом натянутой нити) прямой берут две точки с координатами  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$ . Затем составляют и решают систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = a + bx_1; \\ y_2 = a + bx_2. \end{cases} \quad (\text{VI.19})$$

Метод используется и для кривых любого порядка, особенно многочленов (берется число точек и уравнений, равное числу неизвестных коэффициентов), но точность его в этих случаях невелика.

*Графический метод* подбора коэффициентов прямой заключается в отыскании точки пересечения прямой с

осью  $y$  (коэффициент  $a$ ) и коэффициента  $b$  как тангенса угла ее наклона к оси  $x$  (см. пример VI.11).

Учитывая, что теоретическую прямую легко строить, а опытную аппроксимировать, при определении вида и параметров кривых в инженерной практике чаще всего прибегают к выравниванию их (см. табл. 8). Тогда сначала находят коэффициенты прямой преобразованной зависимости, а по ним легко определяют коэффициенты кривой (иногда они одни и те же, например у некоторых гипербол). Следует учитывать, используя МНК, что после выравнивания равноточность измерений новой переменной может нарушиться. В работе [36] указано, что при сравнении параметров прямой  $a$  и  $b$ , определенных по графику и по МНК, различие всегда весьма невелико. Кроме того, значения коэффициентов могут быть внесены известными методами поправки [64, 78].

**Ошибки кривых.** К этому вопросу может быть два подхода: оценка отклонения опытных точек от сглаженной кривой, оценка точности определения значений функции по этой кривой. Обоснованных практических рекомендаций в данном случае мало, и можно отметить лишь некоторые общие направления решения этой задачи.

**Оценки качества аппроксимации.** Рассматриваются отклонения опытных точек с ординатами  $y_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ , где  $n$  — количество точек) от соответствующих ординат  $\tilde{y}_i$  сглаженной кривой  $\tilde{y}=f(x)$ , т. е.  $\tilde{y}_i - y_i$ . У относительных оценок за 100% принимают ординаты сглаженной кривой. Все оценки целесообразно сопоставлять с  $\sigma_{\tilde{y}_i}$  — стандартными ошибками определения ординат опытных точек и для функциональных зависимостей вывод о согласованности оценки с  $\sigma_{\tilde{y}_i}$ , видимо, является пределом, к которому следует стремиться. В корреляционной зависимости для идеальной модели с этой целью можно использовать  $s_y|_{x_0}$  (см. с. 200). Приведем несколько возможных оценок:

$$a) \sigma_{\text{кр}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum (\tilde{y}_i - y_i)^2;$$

$$б) \delta_{\text{кр}} = \frac{1}{n} \sum |\tilde{y}_i - y_i| / \tilde{y}_i;$$

$$в) |\tilde{y}_i - y_i| = f(x_i) \text{ или } |\tilde{y}_i - y_i| / \tilde{y}_i = f(x_i);$$

$$\text{г) } \Delta_1 = |\tilde{y}_i - y_i|_{\max} \text{ или } \delta_1 = (|\tilde{y}_i - y_i|/\tilde{y}_i)_{\max};$$

$$\text{д) } \Delta_2 = \frac{1}{n} (\Sigma \tilde{y}_i - \Sigma y_i) \text{ или } \delta_2 = (\Sigma \tilde{y}_i - \Sigma y_i) / \Sigma \tilde{y}_i,$$

где  $a$  — наиболее статистически значима для функциональных и корреляционных зависимостей при равноточных измерениях  $y_i$ ;  $b$  — приемлема для функциональных зависимостей, но можно скрыть большие ошибки измерения  $y_{i\min}$ ;  $v$  и  $z$  — целесообразны для функциональных зависимостей при неравноточных измерениях  $y_i$ , но  $v$  удобнее для использования, а для  $z$  следует указывать область значения  $x$ ;  $d$  — рекомендована в [18], но весьма неопределенна, хотя и удобна для проверки совпадения линии и точек.

Качество аппроксимации можно оценить по критерию Фишера ( $F$ )\* — преимущественно корреляционные зависимости, а также по критерию  $\chi^2$  — кривые распределения случайных величин.

Часто приходится для функциональных зависимостей оценивать отклонения сглаженной кривой от теоретической (расчетной) или нескольких сглаженных кривых одна от другой. Здесь можно пока лишь наметить подход без строгого обоснования. Для первого случая можно попробовать проверить гипотезу примера VI.3 при  $\sigma_1 = \sigma_{\tilde{y}_i}$ ;  $\sigma_2$  — стандартная ошибка расчета  $y$  по теоретической формуле,  $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$  соответствует  $|y_{\Phi i} - \tilde{y}_i|_{\max}$ , где  $y_{\Phi i}$  — теоретическое значение  $y$ , при этом  $n_1 = n_2 = 1$ , если кривые пересекаются, и  $n_1 = n_2 = m$ , где  $m$  — количество опытных точек, если они эквидистантны. Во втором случае можно попытаться провести однофакторный дисперсионный анализ, если кривые близки к эквидистантным, полагая каждую кривую  $j$ -том уровнем фактора,  $\sigma_{\text{кр}j}$  по (VI.20) принять за  $s_{yj}$ , средние  $y_j$  и  $\bar{y}$  рассчитать по (IV.4), общую дисперсию  $s^2$  определить по отклонениям  $y_{ij}$  от усредненной кривой, а  $n_j$  принять равным количеству опытных точек  $j$ -той кривой (в настоящее время эти оценки будут по крайней мере лишены субъективности). Для корреляционных зависимостей при идеальной модели (см. с. 199) это сравнение можно провести проверкой гипотез об их параллельности и совпадении.

*Оценка точности определения значений функции по опытной кривой.* Для корреляционных зависимостей при

---

\* Длин А. М. Математическая статистика в технике. М.: Советская наука, 1958, с. 169.

идеальной модели можно воспользоваться величиной  $s_y|_{x_0}$  (см. с. 200). Для функциональных зависимостей с равноточными измерениями стандартная ошибка находится в пределах  $\sigma_{кр} \dots \sigma_{\bar{y}}$ , с неравноточными — зависит от  $x$  и равна  $\sigma \tilde{y}_i$ .

В принципе на точность определения  $\tilde{y}_i$  по значению  $x_i$  будет влиять и ошибка  $\sigma_{\bar{x}}$  измерения  $x_i$ . Допустим, кривая  $y=f(x)$  имеет ошибку  $\sigma_{кр}$ , значение  $x$  измерено с ошибкой  $\sigma_{\bar{x}}$ , тогда с учетом (IV.15 и IV.24) ошибка найденного по графику или таблице значения функции

$$\sigma_y^2 = \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \sigma_{\bar{x}}^2 + \sigma_{кр}^2. \quad (\text{VI.21})$$

В хороших справочных таблицах зависимостей  $y=f(x)$  обычно указывают значения их ошибок при  $\sigma_{\bar{x}}=0$ .

**Пример VI.11.** Опытные данные представлены двумя верхними строками таблицы 9. Вероятная ошибка измерения  $y_i$  равна  $\rho_{\bar{y}}=1,5$ . Физическая сущность зависимости, допустим, не ясна. Нанеся точки на график (рис. 24) и сгладив их графическим методом, приходим к выводу, допустим, по набору типовых кривых [18], что зависимость имеет вид  $y=a+bc+cx^2$ . Судя по таблице 8, зависимость выравнивается заменой  $y$  на  $y'=(y-y^*)/(x-x^*)$ .

За избранную точку возьмем точку ( $x^*=5$  и  $y^*=20$ ) — через нее проходит сглаженная кривая. Значение  $y'_i$  при  $x=5$  находят интерполяцией. Полагая, что  $x_i$  измерены с  $\rho_{\bar{x}} \ll \rho_{\bar{y}}$  ошибки  $y'_i$ , в соответствии с (IV.25) и пояснениями к ней складываются из ошибок измерения  $y_i$  и  $y^*$  и равны  $\rho_{\bar{y}}/\sqrt{2}$ . Точки ( $x_i; y'_i$ ) нанесены на график рисунка 25 (с. 215). Прямая линия  $y''=f(x)$  проведена с использованием графического сглаживания. На рисунках 24, 25 масштабы по осям  $y$  и  $y'$  соответствуют требованиям, изложенным на странице 183.

Далее находят параметры  $A$  и  $B$  прямой  $y''=A+Bx$ . Здесь  $A=20$  (значение  $y''$  при  $x=0$ );  $B=\tan \alpha = (y''_{i+k} - y''_i)/(x_{i+k} - x_i) = (y''_3 - y''_2)/(x_3 - x_2) = -12/6$ . Параметры  $a$ ,  $b$  и  $c$  находят следующим образом:  $A+Bx = (a+bx+cx^2 - y^*)/(x-x^*)$ . Освободившись от знаменателя и сгруппировав слева члены по  $x^0$ ,  $x^1$  и  $x^2$ , получим:  $(y^* - Ax^*)x^0 + (A - Bx^*)x^1 + Bx^2 = ax^0 + bx^1 + cx^2$ . Откуда  $a=120-20 \cdot 5=20$ ;  $b=20-(-2)5=30$ ;  $c=-2$ .

Опытная зависимость аппроксимируется выражением  $y_a = 20 + 30x - 2x^2$ . Рассчитанные значения  $y_a$  представлены в шестой строке таблицы 9, квадраты отклонений опытных точек от расчетных — в восьмой. Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{кр} = \sqrt{73/(9-1)} = 3$  и превышает  $\sigma_{\bar{y}} = 2,25$  в 1,3 раза ( $\sigma_{\bar{y}} = 1,5\rho_{\bar{y}}$ ). Средние значения ординат  $\bar{y}_a = \Sigma y_{ai}/9 = 94,7$ ;  $\bar{y} = \Sigma y_i/9 = 93,7$ ; абсолютная разность  $\bar{y}_a - \bar{y} = 1$ ; относительная  $1/94,7 = 1,06\%$ . Максимальные отклонения  $\pm 4$ , что следует считать нормальными при  $\sigma_{\bar{y}} = 2,25$ , в интервале значений аргумента 2...4.

Таблица 9. Результаты расчетов при аппроксимации опытной зависимости

| 1 | $x_i$              | 0    | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|---|--------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2 | $y_i$              | 18   | 52  | 69  | 88  | 111 | 121 | 125 | 135 | 132 |
| 3 | $y_i - y^*$        | -102 | -68 | -51 | -32 | -9  | +   | 5   | 15  | 12  |
| 4 | $x_i - x^*$        | -5   | -4  | -3  | -2  | -1  | +   | 1   | 2   | 3   |
| 5 | $y_i'$             | 20   | 22  | 17  | 16  | 9   | 7,5 | 5   | 7,5 | 4   |
| 6 | $y_{ai}$           | 20   | 48  | 72  | 92  | 108 | 120 | 128 | 132 | 132 |
| 7 | $y_i - y_{ai}$     | -2   | 4   | -3  | -4  | 3   | 1   | -3  | 3   | 0   |
| 8 | $(y_i - y_{ai})^2$ | 4    | 16  | 9   | 16  | 9   | 1   | 9   | 9   | 0   |

Используя метод наименьших квадратов, может быть, можно несколько улучшить эти в целом неплохие для рассмотренных данных показатели.

Найдем ошибку определения  $y$  по полученной зависимости при  $x_i=3$ , если  $\sigma_{кр}=3$ , а  $\sigma_{\bar{x}}=0,1$ . Для функции  $y(x)$   $dy/dx = \Delta y / \Delta x \approx [y_a(x_{i+1}) - y_a(x_{i-1})] / (x_{i+1} - x_{i-1}) = (108 - 72) / (4 - 2) = 18$ .  $\sigma_y^2 = 18^2 \cdot 0,1^2 + 3^2 = 12,24$ ;  $\sigma_y = 3,5$

## 7. Некоторые типичные задачи обработки и анализа

**Интерполяция** — отыскание значения функции внутри интервала изменения аргумента по известным ее значениям на границах и за пределами этого интервала. Задача интерполяции в наших исследованиях возникает при выравнивании кривой по типу примера VI.11, отыскании  $y_i$ , соответствующего отсутствующему в таблице значению  $x$ ; при перестройке таблиц с неравномерным интервалом переменной в таблицы с равномерным интервалом; а также при определении значения  $x$  по известному значению  $y$  (обратная интерполяция).

Интерполяция целесообразна по сглаженным опытными данным. Очевидно, что она возможна на участке функции, не имеющем разрыва. Проста интерполяция по достаточно точному графику и по формулам опытной зависимости. Часто приходится решать эту задачу, используя табличные данные при отсутствии графиков и формул.

Всем инженерам известна линейная интерполяция по двум точкам, дающая достаточно точные результаты и для нелинейных зависимостей при больших значениях функции и малой кривизне зависимости. В других случаях ею пользоваться следует осторожно.

**Пример VI.12.** Определить по данным примера VI.11 значение  $y$  в точке  $C$  при  $x_C=4,5$ . Ближайшие к  $C$  точки:  $A(x_5, y_5)$  и  $B(x_6, y_6)$  или  $A(4; 108)$  и  $B(5; 120)$ . По формуле линейной интерполяции

$$y_C = y_A + \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} (x_C - x_A) = 108 + \frac{120 - 108}{5 - 4} (4,5 - 4) = 114. \quad (VI.22)$$

По аппроксимирующему выражению  $y_C=114,5$ . Ошибка второго слагаемого около 8% — при малых  $y_A$  и  $y_B$  ошибка  $y_C$  могла бы достигнуть 6...7% только за счет интерполяции.

В ответственных случаях при нелинейных зависимостях используются интерполяционные формулы Лагранжа, Ньютона и др. [18, 42, 64, 69, 78].

**Экстраполяция** как метод прогнозирования рассмотрена с принципиальных позиций в главе III. Она также используется при контроле за ходом эксперимента, при анализе опытных данных и с целью получения новой информации. Ниже отмечены некоторые особенности экстраполяции опытных зависимостей.

Полагают, что до  $B:A=1:5$ , где  $A$  — база экстраполяции, а  $B$  — экстраполируемый интервал, а по [18] при  $B$ , равном одному интервалу изменения аргумента, экстраполяция по опытным формулам и графикам с нераскрытой физической сущностью зависимостей дает практически приемлемую точность. Особенно осторожно следует использовать многочлены высоких степеней, так как члены с высокими степенями  $x$ , вводимые в них для поправок, при экстраполяции могут играть доминирующую роль. В частности, кривая типа представленной на рисунке 24, иногда может быть сглажена гиперболой и многочленом. С увеличением  $x$  гипербола будет, судя по рисунку, приближаться к асимптоте  $y \approx 135$ , для многочлена, полученного в примере VI.11, при  $x=10$  значение  $y=120$ , а при  $x=15$  оно составит  $y=20$ .

Рациональную зависимость целесообразно экстраполировать, применив ее формулу. Часто при экстраполяции используют интерполяционную формулу Лагранже. Полагают, что этот метод предпочтительнее графического, выполняемого «на глаз», поскольку выравнивание опытной зависимости практически устраняет этот недостаток графической экстраполяции.

Интересна экстраполяция при  $x \rightarrow \infty$  («экстраполяция на бесконечность»), которая позволяет иногда оценить правильность выбора вида зависимости и полученных



данных. В этом случае целесообразен переход к новым переменным  $x'$  и  $y'$ , обеспечивающим конечность  $y'$  при  $y = \infty$ . С аналогичными целями проводят «экстраполяцию на нуль», так как часто известно заранее, что  $y(0) = 0$ . Например, получены данные, соответствующие зависимости  $y = ax^c$  ( $c$  — известно). Возможны обе рассмотренные проверки. Эта кривая выравнивается в линейных координатах заменой  $x_i$  на  $x_i' = x_i^c$ . Если  $y = f(x')$  не проходит через нуль, то имеется, видимо, систематическая ошибка. Построив в линейных же координатах зависимость  $1/y = 1/x'$  (она тоже прямая), находим, допустим, что она не проходит через нуль, значит, имеется ошибка типа ошибки старения (этот пример с опытными данными приведен в [78]).

Отметим, что экстраполяция корреляционных зависимостей менее точна, чем функциональных, так как ошибки определения  $y$  по  $x$  растут при изменении  $x$  от середины интервала его значений к краям. Это видно по  $s_{y|x_0}$  в (VI.14).

**Дифференцирование и интегрирование опытных зависимостей** — один из наиболее используемых методов анализа. Академик В. П. Горячкин указывал, что при исследовании явления нельзя ограничиваться одним основным графиком его развития или рядом цифр. Необходимо изучить протекание, скорость и ускорение процессов. Исследователь обычно фиксирует один из этих показателей, более информативный или проще измеряемый. В процессах разгона или торможения объектов удобно измерять ускорения — это измерение не требует привязки к неподвижным объектам. По записи кривой текущей нагрузки определяют среднее ее значение. Приходится искать максимумы и минимумы опытных зависимостей. С дифференцированием связано определение ошибок измерений.

Известны методы графического дифференцирования, но их обычно используют при графическом анализе в теории машин и механизмов.

Численное интегрирование не требует предварительного сглаживания. Дифференцировать же лучше аналитические выражения опытных зависимостей. Рис. 27 иллюстрирует изложенное. Кривая 1 (рис. 27, а) на небольшом участке немного отличается от кривой 2, кривые их интегралов отличаются весьма мало (рис. 27, б), кривые уже первых производных отлича-

ются значительно (рис. 27, в). Методы численного интегрирования и дифференцирования изложены в литературе [42, 64, 69, 73 и др.].

**Гармонический анализ** — это отыскание синусоидальных составляющих данной сложной периодической кривой. Он играет чрезвычайно важную роль в технических задачах, так как часто составляющие говорят много больше, чем сама заданная сложная кривая. На рисунке 28, а показана периодическая кривая, допустим,

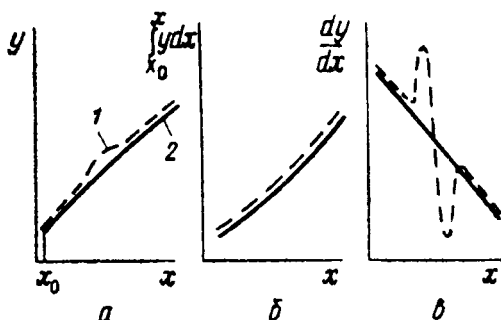


Рис. 27. К вопросу точности численных методов:

а — исходные зависимости; б — их интегралы; в — их производные.

какой-то силы. Несимметричная форма графика этой силы достаточно точно воспроизводится суммой трех синусоидальных составляющих (рис. 28, б). Каждая из этих составляющих вызывает свои вынужденные колебания системы, которые могут иметь разные амплитуды (рис. 28, в). Можно заметить, что колебания средней частоты близки к резонансным.

Если записать на ленту осциллографа вынужденные колебания системы, вызываемые силой (рис. 28, а), то получим кривую (рис. 28, г), совершенно непохожую на кривую возбуждающей силы. При гармоническом анализе по кривой (рис. 28, г) находят синусоиды (рис. 27, в) или по кривой (рис. 27, а) кривые (рис. 27, б).

Важность этого анализа определяется присутствием периодических, отличных от идеальных, синусоидальных возбуждающих сил практически в каждой машине, в каждом механизме и необходимостью предотвращения резонансных вынужденных колебаний. Решение этой задачи связано с определением частот и амплитуд

составляющих сложных, а иногда очень простых на вид периодических кривых.

Гармонический анализ выполняется разными методами. Для некоторых кривых (например, прямоугольный импульс, симметричные треугольный и трапецидальный импульсы, срезанная синусоида) существуют формулы разложения и таблицы с коэффициентами этих формул (с коэффициентами Фурье). Известны методы численного гармонического анализа [42 и др.]. Они требуют использования ЭВМ. Практический гармонический анализ выполняется с помощью электронных анализаторов — спектральных анализаторов.

Гармонический анализ двух-трехкомпонентных кривых со значительно отличающимися частотами составляющих можно выполнить графически — методом огибающих [18]. Вначале двумя огибающими — верхней и нижней — обводят высокочастотные колебания. Отрезки ординат между ними определяют амплитуды высшей гармоники. Колебания полосы показывают периоды и волны с меньшей частотой. Далее аналогично поступают с одной огибающей, выявляя амплитуду и частоту следующей гармоники. Таким методом легко выделить сумму двух высших гармоник (или низшую) на кривой (рис. 28, *г*), но разделить гармоники с частотами, допустим, 1 и 1,5 Гц, уже не удастся.

После «разложения» кривой на составляющие следует проанализировать компоненты, может быть выявить их источник, сравнить между собой, выразить кривую суммой синусоид. Ошибку найденной формулы можно оценить максимальными разностями амплитуд и периодов опытной и рассчитанной по формуле кривых.

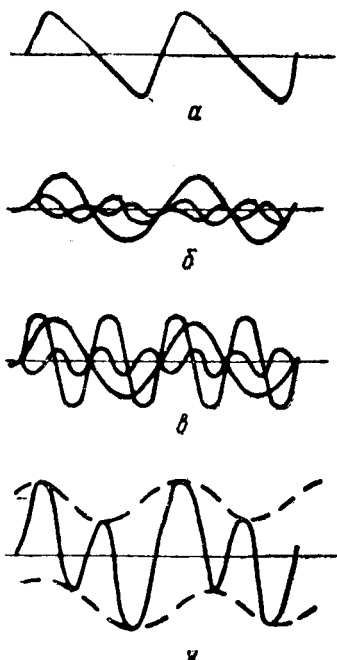


Рис. 28. Гармонические составляющие периодических процессов.

## 8. Использование ЭВМ в исследованиях

Электронно-вычислительные машины находят все более широкое применение в исследованиях по механизации сельского хозяйства. Они ускоряют решения, вычисления и повышают их точность, а в ряде случаев только они и делают решение возможным. Например, решения, получаемые методами математического программирования, Монте-Карло возможны без ЭВМ лишь в простейших случаях.

Однако до сих пор еще существует психологический барьер, т. е. многие исследователи еще боятся ЭВМ, так же как наши предки боялись «неберущихся» интегралов. Этот барьер следует преодолеть. Не надо впадать и в другую крайность. Использование ЭВМ не призвано заменять другие математические методы (аналитические и графические решения, «ручной» счет и т. д.), а должно сочетаться с ними [36].

Практически для всех методов исследования, обработки и анализа опытных данных, рассмотренных в этой книге, и для других методов, имеются стандартные или библиотечные программы решений с использованием ЭВМ. При необходимости может быть составлена специальная программа для поставленной задачи.

Судя по замечаниям специалистов, например [27, 36, 73], при обращении к ЭВМ и работе с ней следует руководствоваться некоторыми положениями, позволяющими предотвратить ряд ошибок и промахов. Иногда получается масса чисел, из которых невозможно выудить полезную информацию. «Прежде чем решать задачу, подумай, что делать с ее решением» [73].

При ориентации на ЭВМ, формулируя задачу в виде дифференциальных или интегральных уравнений, необходимо думать о том, как они выглядят в дискретном виде — с переводом могут быть осложнения.

Прежде чем обращаться к ЭВМ, необходимо понять суть и модели используемого метода решения задачи и соответствующий ему ход расчетов, разобраться, какой конкретной модели соответствуют опытные данные и какие показатели нужно и можно из них получить.

Внимательного анализа требует и стандартная программа. Нужно знать, какая модель заложена в нее и как идут вычисления по ней, на каких этапах возможен вывод на печать и что выводится, какие проверки ре-

результатов предусмотрены программой. Помощь в решении этих вопросов могут оказать математики, статистики и программисты. Без этого подхода легко получить результаты, которые не имеют отношения к задаче или не соответствуют заложенным данным. Например, полный регрессионный анализ возможен для идеальной модели (см. с. 199), но ЭВМ обработает по программе для этой модели любые заложенные данные. Целесообразно ознакомиться с имеющимися в вычислительном центре (ВЦ) программами к используемому методу — это иногда помогает уточнить методику получения опытных данных и всегда уточняет методику их обработки, подготовку к расчету на ЭВМ и форму представления в ВЦ.

Использование ЭВМ иногда выдвигается как доказательство точности и надежности полученных результатов. Это ошибочный подход. Они требуют контроля, анализа и проверки, как и любые другие, так как формальное использование стандартных программ может исказить результат, сбой машины ведет к грубым ошибкам и т. п. Принципиально важен вопрос ошибок округления. В длинных цепочках расчетов, когда последующие результаты получаются с использованием предыдущих, с некоторого момента получаются одни лишь ошибочные данные.

Повторим в заключение мысль академика Я. Б. Зельдовича: «Пользуйтесь ЭВМ! Проводите вычисления по своим задачам сами, не поручайте это другим» [36].

К этой главе рекомендуется следующая литература: [8, 18, 19, 21, 27, 28, 30, 31, 33, 36, 42, 48, 49, 52, 64, 67, 69, 73, 78, 79].

# Список литературы

1. Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Госполитиздат, 1981.
2. Агемян Т. А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков. М.: Наука, 1972.
3. Айвазян С. А. Статистические исследования зависимостей. М.: Металлургия, 1968.
4. Айзерман А. Классическая механика. М.: Наука, 1974.
5. Алабужев П. М. и др. Теория подобия и размеренностей. Моделирование. М.: Высшая школа, 1968.
6. Болотов А. С., Тлупов С. X. Зависимость выхода продукции растениеводства от оснащенности колхозов техникой и уровня ее использования.—Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1980, № 10.
7. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965.
8. Браули К. А. Статистическая теория и методология в науке и технике. М.: Наука, 1977.
9. Брусенцов Л. В. Приборы для записи и анализа статистических данных. Метод теневого графика. М.: Энергия, 1969.
10. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1979.
11. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 1—3. М.: Мир, 1972.
12. Варшавский К. М. Организация труда научных работников. М., Экономика, 1975.
13. Василенко П. М. Об уравнении движения мобильных машинных агрегатов. В сб. «Земледельческая механика». Т. VI. Сельхозгиз, 1961.
14. Василенко П. М. Построение математических моделей машинных агрегатов.—Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1975, № 11.
15. Василенко П. М. О методике построения математической модели машинного агрегата.—Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1976, № 7.
16. Василенко П. М., Василенко В. П. Методика построения моделей функционирования машинных агрегатов.—Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1979, № 12.
17. Василенко П. М., Василенко В. П. Методика построения моделей функционирования механических систем (машин и машинных агрегатов). Киев: 1980.
18. Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. М.: Колос, 1973.
19. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1974.
20. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980.
21. Виленин С. Я. Статистические методы исследования систем автоматического регулирования. М.: Советское радио, 1967.

22. Власов-Власюк О. Б. Экспериментальные методы в автоматике. М.: Машиностроение, 1969.
23. Высоцкий А. А. Динамометрирование сельскохозяйственных машин, М.: Машиностроение, 1968.
24. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1977.
25. Горячкин В. П. Собрание сочинений в трех томах. М.: Колос, 1968.
26. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973.
27. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1980.
28. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. М.: Мир, 1981.
29. Добров Г. М. Прогнозирование науки и техники. М.: Наука, 1977.
30. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1968.
31. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973.
32. Завалишин Ф. С. Основы расчета механизированных процессов в растениеводстве. М.: Колос, 1973.
33. Зажигаев Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М.: Атомиздат, 1978.
34. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974.
35. Зайченко Ю. П. Исследование операций. Киев: Вища школа, 1975.
36. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1972.
37. Зуховицкий С. М., Авдеева Л. И. Линейное и выпуклое программирование. М.: Наука, 1967.
38. Иофинов С. А., Райхлин Х. М. Приборы для учета и контроля работы тракторных агрегатов. Л.: Машиностроение, 1972.
39. Кардашёвский С. В., Погорелый Л. В. и др. Испытания сельскохозяйственной техники. М., Машиностроение, 1979.
40. Клайн С. Дж. Подобие и приближенные методы. М.: Мир, 1968.
41. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979.
42. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1979.
43. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание: теория и приложение. М.: Мир, 1965.
44. Коченов М. И. Вероятностное моделирование в задачах точности. М.: Наука, 1973.
45. Ланге О. Введение в экономическую кибернетику. М.: Прогресс, 1968.
46. Левин Л. Методы решения технических задач с использованием аналоговых вычислительных машин. М.: Мир, 1966.
47. Лихачев В. С. Испытания тракторов. М.: Машиностроение, 1974.

48. Лурье А. Б. Динамика регулирования навесных сельскохозяйственных агрегатов. Л.: Машиностроение, 1969.
49. Лурье А. Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. М.—Л.: Колос, 1981.
50. Лурье А. И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961.
51. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. М.: Колос, 1980.
52. Митков А. Л., Кардашевский С. В. Статистические методы в сельскохозяйственном машиностроении. М.: Машиностроение; София: Земиздат, 1978.
53. Моисеев Н. Н. Элементы теории оптимальных систем. М.: Мысль, 1970.
54. Налимов В. В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971.
55. Нейлор Т. и др. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем. М.: Мир, 1975.
56. Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. М.: Машгиз, 1969.
57. Основы автоматического управления. Под ред. Пугачева В. С. М.: Наука, 1968.
58. Основы планирования эксперимента в сельскохозяйственных машинах. РТМ 23.2.36.73 М.: ВИСХОМ, 1973.
59. Погорелый Л. В., Брей В. В. Системный анализ и прогнозирование эффективности машин и комплексов по результатам испытания.—Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1978, № 11.
60. Погорелый Л. В. Системный принцип прогнозирования типажа свеклоуборочных машин.—Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1975, № 9.
61. Приходько П. Т. Пути в науку. М.: Знание, 1973.
62. Проблемы методологии системного исследования. М.: Мысль, 1970.
63. Рузавин Г. И. Методы научного исследования. М.: Мысль, 1974.
64. Румшиский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971.
65. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложение. М.: Советское радио, 1971.
66. Сборник задач по теории надежности. Под ред. Половко А. М., Маликова И. М. М.: Советское радио, 1972.
67. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных процессов. М.: Наука, 1968.
68. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968.
69. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин. Т. 4. М.: Машиностроение, 1969.
70. Справочник по надежности. М.: Мир, том I, 1969, том II и III, 1970.
71. Стульнев В. К. Вероятностно-статистические методы теории исследования операций. М.: Знание, 1973.
72. Финни Д. Введение в теорию планирования эксперимента. М.: Наука, 1970.
73. Хемминг Р. В. Численные методы. М.: Наука, 1972.
74. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. М.: Мир, 1967.



75. Холл А. Опыты методологии для системотехники. М.: Советское радио, 1975.
76. Четыркин Е. М. Теория массового обслуживания и ее применение в экономике. М.: Статистика, 1971.
77. Шаров Н. М. Эксплуатационные свойства машинно-тракторных агрегатов. М.: Колос, 1981.
78. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972.
79. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. М.: Наука, 1980.
80. Щедрин Н. И., Кархов А. Н. Математические методы программирования в экономике. М.: Статистика, 1973.
81. Электрические измерения. Под ред. Шрамкова Е. Г. М.: Высшая школа, 1972.

# Оглавление

|  |            |
|--|------------|
| Введение . . . . .   | 3          |
| <b>Глава I. Задачи и этапы научного исследования . . . . .</b>                       | <b>5</b>   |
| 1. Определение и значение науки . . . . .  | 5          |
| 2. Методология научного исследования . . . . .                                       | 8          |
| 3. Схема научного исследования и ее элементы . . . . .                               | 10         |
| 4. Изучение состояния вопроса . . . . .  | 14         |
| 5. Постановка вопроса и задачи исследования . . . . .                                | 17         |
| 6. Гипотеза . . . . .  | 21         |
| 7. Выбор наиболее общего метода исследования . . . . .                               | 26         |
| 8. Понятие о теоретических исследованиях . . . . .                                   | 29         |
| 9. Сущность эксперимента . . . . .   | 36         |
| 10. Обработка опытных данных и анализ решений . . . . .                              | 38         |
| 11. Экономическая эффективность исследования . . . . .                               | 40         |
| 12. Выводы и внедрение . . . . .   | 41         |
| <b>Глава II. Организация работы исследователя . . . . .</b>                          | <b>47</b>  |
| 1. Личная работа исследователя . . . . .   | 47         |
| 2. О диссертации . . . . .   | 56         |
| <b>Глава III. Механико-математические методы исследования . . . . .</b>              | <b>60</b>  |
| 1. К выбору метода исследования . . . . .  | 60         |
| 2. Методы классических наук . . . . .  | 63         |
| 3. Статистическая динамика . . . . .   | 68         |
| 4. Теория подобия и физическое моделирование . . . . .                               | 72         |
| 5. Аналоговое моделирование . . . . .  | 73         |
| 6. Теория массового обслуживания . . . . .   | 74         |
| 7. Статистическое моделирование . . . . .  | 79         |
| 8. Математические методы программирования . . . . .                                  | 81         |
| 9. Теория эксперимента . . . . .   | 84         |
| 10. Системный подход . . . . .   | 92         |
| 11. Метод аналогий . . . . .   | 96         |
| 12. Метод экстраполяции . . . . .  | 97         |
| <b>Глава IV. Точность измерений . . . . .</b>  | <b>100</b> |
| 1. Общие положения . . . . .   | 100        |
| 2. Виды измерений . . . . .  | 101        |
| 3. Виды ошибок . . . . .   | 104        |
| 4. Случайная ошибка, ее источник и характеристики . . . . .                          | 106        |
| 5. Пути уменьшения и суммирование случайных ошибок . . . . .                         | 111        |
| 6. Промех и его исключение . . . . .   | 116        |
| 7. Средства измерений и их характеристики, определяющие точность измерений . . . . . | 117        |
| 8. Калибровка и ошибка прибора . . . . .   | 123        |
| 9. Систематическая ошибка, пути ее выявления, уменьшения и исключения . . . . .      | 128        |

|  |            |
|--|------------|
| 10. Общая ошибка измерений и ошибка косвенных измерений . . . . .                  | 132        |
| 11. Анализ ошибок при планировании эксперимента                                    | 134        |
| 12. Ошибка округления и точность вычислений . . . . .                              | 135        |
| <b>Глава V. Программа и методика эксперимента . . . . .</b>                        | <b>137</b> |
| 1. Общие положения . . . . .   | 137        |
| 2. Выявление факторов, определяющих явление, и контролируемых параметров . . . . . | 140        |
| 3. Выбор и обоснование точности результатов измерений . . . . .                    | 146        |
| 4. Измеряемые параметры и их фиксация . . . . .                                    | 148        |
| 5. Выбор приборов для измерений . . . . .  | 157        |
| 6. Планирование опытов . . . . .   | 162        |
| 7. Подготовка и проведение опытов . . . . .  | 168        |
| <b>Глава VI. Методы обработки и анализа опытных данных</b>                         | <b>177</b> |
| 1. Общие вопросы обработки и анализа . . . . .                                     | 177        |
| 2. Подготовка к обработке опытных данных . . . . .                                 | 181        |
| 3. Оценки значений измеряемых величин . . . . .                                    | 184        |
| 4. Статистический анализ опытных данных . . . . .                                  | 187        |
| 5. Сглаживание опытных зависимостей . . . . .                                      | 206        |
| 6. Выражение опытных зависимостей формулами . . . . .                              | 213        |
| 7. Некоторые типичные задачи обработки и анализа . . . . .                         | 219        |
| 8. Использование ЭВМ в исследованиях . . . . .                                     | 224        |
| <b>Список литературы . . . . .</b>   | <b>226</b> |

**Федор Семенович Завалишин,  
Михаил Григорьевич Мацнев**

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МЕХАНИЗАЦИИ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Редактор Л. И. Чичева  
Художник Д. А. Шпаков  
Художественный редактор А. И. Бершачевская  
Технический редактор Т. Э. Прушинская  
Корректор Н. Я. Туманова

**ИБ № 2846**

Сдано в набор 30.11.81. Подписано к печати 16.04.82. Т-07169.  
Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная.  
Печать высокая. Усл. печ. л. 12,18. Усл. кр.-отт. 12,39. Уч.-изд.  
л. 13. Изд. № 129. Тираж 3000 экз. Заказ № 4040. Цена 80 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Колос»,  
107807, ГСП, Москва, Б-53, ул. Садовая-Спасская, 18.

Типография им. Смирнова Смоленского облуправления издательств,  
полиграфии и книжной торговли, г. Смоленск, пр. им. Ю. Гагари-  
на, 2.

---

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

— система ~~уравнений~~, описывающих поведение идеализированного объекта

---

## ГИПОТЕЗА

— научное предположение о сущности явления, внешне проявляемом определенным образом или предположение о виде количественной связи между изучаемыми объектами, между параметрами и характеристиками

---

## ВЫВОДЫ

— краткое изложение полученных результатов

---

## РЕКОМЕНДАЦИЯ

— совет, указание, вытекающее из исследования о внесении изменений в практику

---

## ВНЕДРЕНИЕ

— фактическое использование результатов исследования на практике

---

80 коп.

Книга адресована  
молодому специалисту,  
научному работнику,  
решившему посвятить се  
научной деятельности  
в области механизации  
сельского хозяйства.



0



$x_{i \min}$

$x_i$

$\bar{x} = m_x$

$x_{i \max}$