



**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Технология машиностроения»**

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ РАБОЧИХ МАШИН**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
для магистрантов специальности 1-36 80 02  
«Инновационные технологии в машиностроении»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2024**

УДК 681.523+62-82-85(075.8)  
ББК 32.965.2я73  
Т33

*Рекомендовано научно-методическим советом  
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 5 от 20.06.2022 г.)*

Составитель *Д. Л. Стасенко*

Рецензент: главный конструктор ОАО «ГСКТБ ГА» *А. А. Гинзбург*

**Теоретические** принципы исследований и испытаний рабочих машин : учеб.-метод. пособие для магистрантов специальности 1-36 80 02 «Инновационные технологии в машиностроении» днев. и заоч. форм обучения / сост. Д. Л. Стасенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – 95 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит теоретические основы проведения различных видов испытаний, которым подвергаются машины и механизмы, представлены методы, средства измерений и оборудование для проведения различных видов испытаний, предложены методики различных видов испытаний, с современной позиции рассмотрены вопросы планирования и анализа испытаний.

Для магистрантов специальности 1-36 80 02 «Инновационные технологии в машиностроении» дневной и заочной форм обучения.

УДК 681.523+62-82-85(075.8)  
ББК 32.965.2я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	4
Тема 1	Общие сведения об экспериментальных методах исследований и испытаний	6
Тема 2	Измерительная аппаратура	19
Тема 3	Регистрирующая аппаратура	24
Тема 4	Информационно-измерительные системы (ИИС) и измерительно-вычислительные комплексы (ИВК)	25
Тема 5	Методологические основы исследований и испытаний	33
Тема 6	Методы стендовых испытаний и исследований	62
Тема 7	Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований	69
Тема 8	Методы аппроксимации результатов измерений эмпирическими зависимостями	91
	Литература	95

## ВВЕДЕНИЕ

В технике и инженерных разработках первостепенное значение придается экспериментальной отработке новых изделий и различного вида испытаниям. Детальный анализ жизненного цикла технической системы показывает, что среди основных событий цикла важное место занимают испытания. Испытания (ГОСТ 16504-81) – это экспериментальное определение количественных и (или) качественных свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании.

В настоящее время можно с определенной степенью уверенности констатировать, что разработаны и существуют теоретические основы оптимального проектирования технических систем, позволяющие выбирать наилучшие в определенном смысле конструктивные параметры, законы управления и другие характеристики систем. Но, к сожалению, еще отсутствует приемлемая теория испытаний и эксплуатации, позволяющая оптимизировать эти весьма важные этапы жизненного цикла сложной системы.

Вопрос о создании в ближайшие годы теории испытаний сложных технических систем является чрезвычайно проблематичным. Испытания в целом представляют собой весьма сложный процесс, характеризующийся огромной разнородностью решаемых задач, многоуровненностью этапов испытаний, неоднородностью информационных потоков, циркулирующих в самой системе испытаний, многообразием оцениваемых характеристик испытываемых систем, наличием ограниченного числа образцов, выделяемых на проведение испытаний, и т. п.

Различают испытания в широком и узком смыслах. Очевидно, что узкий смысл испытаний определяется теми конкретными задачами, которые решаются с использованием информации, полученной в процессе проведения испытаний. Такими задачами могут быть доработка системы, уточнение ее математической модели, сдача системы заказчику, контроль состояния системы, диагностика, оценка характеристик надежности и т. д. Поэтому можно говорить об испытаниях, связанных с доработкой системы и уточнением ее математической модели, о приемосдаточных испытаниях, об испытаниях в целях контроля и т. д.

Наряду с методиками испытаний в учебно-методическом пособии дается описание испытательного оборудования и

измерительной аппаратуры, обработки и анализа полученных экспериментальных данных.

В промышленности действуют государственные и отраслевые стандарты, а также руководящие технические материалы по различным видам испытаний. Ими руководствуются при проведении соответствующих испытаний. Применение научного экспериментирования при исследованиях работоспособности и надежности требуют учета специфики этих задач, и это зачастую обуславливает их оригинальную постановку. Данные методы можно эффективно использовать при оценке влияния структурных, конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на работоспособность и надежность устройств.

Планирование и анализ испытаний рассматриваются с позиций теории математического планирования эксперимента. Анализируются различные планы факторных экспериментов: полные факторные, усеченные, несимметричные, методы оптимизации и исследований поверхности отклика, и комбинаторные задачи планирования многофакторных экспериментов.

Для испытаний, как правило, характерны динамичность, ограниченность временных ресурсов, оперативность. Оптимальная запланированная программа испытаний на практике непрерывно возмущается. В этих условиях эффективной является та система испытаний, которая вовремя компенсирует влияние возмущающих воздействий или корректирует программу испытаний за счет выработки оперативных управленческих решений.

Научные проблемы, решаемые на этапах обработки результатов измерений, связаны с выбором математических моделей объекта испытаний, тракта передачи и обработки измерительной информации, с обоснованием оптимальных методов обработки информации, соответствующего математического обеспечения вычислительной техники и средств отображения информации и т.д.

Основными требованиями к испытаниям мобильных и технологических машин должны быть: безопасность, экономическая целесообразность, информативность и достоверность.

## **Тема 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ**

### **1.1. Роль исследований в совершенствовании и разработке гидропневмосистем мобильных и технологических машин**

Современные рабочие машины - это сложные и дорогостоящие инженерные конструкции, эффективность использования которых во многом определяется их надежностью. Обеспечение надежности в процессе создания машин заключается в выявлении и устранении допущенных при разработке причин, приводящих к отказам, а также в организации условий производства и их эксплуатации, которые исключили бы появление новых причин отказов. Таким образом, отказы в функционировании машин и их элементов связаны с ошибками проектно-конструкторских разработок, технологии изготовления и эксплуатации. Устранение ошибок и недоработок проектно-конструкторского характера осуществляется в процессе различных испытаний агрегатов и систем.

Экспериментальные исследования и отработка конструкций имеют своей целью разработку и уточнение методик расчета, их экспериментальное подтверждение. Эти исследования обычно выполняются на моделях в широком диапазоне варьируемых параметров конструкции. Модели изготавливают в уменьшенном масштабе, конструктивно подобными натурной конструкции. Элементы, не существенные для прочности и жесткости, не воспроизводятся. Указанные испытания нужны при разработке и внедрении новых конструктивно-силовых схем, конструкционных материалов, технологических процессов и т.д. В результате экспериментальных исследований подтверждаются фактические характеристики и работоспособность элементов и агрегатов. Обязательным условием при испытаниях конструкций является обеспечение реальных условий заделки торцов. В экспериментальной сборке должны быть установлены все конструктивные элементы, влияющие на прочность и жесткость (приварные элементы, местные вырезы, конструктивные надстройки). Данная группа исследований включает статические и динамические испытания отдельных узлов, агрегатов и элементов, испытания теплоизоляционных и теплозащитных покрытий.

В процессе статических испытаний:

- определяют истинные значения прочностных и жесткостных характеристик с учетом всех особенностей конструкции, технологии и материалов;

- подтверждают принятые в расчетах значения коэффициентов безопасности и результаты расчета напряженного состояния и жесткости конструкции при эксплуатационных нагрузках или указывают на ошибочность используемых в конструкции узлов и агрегатов решений;

- выявляют на основании анализа результатов разрушающих испытаний истинные причины разрушения конструктивных элементов;

- выявляют в результате анализа напряженного состояния и деформаций элементы и узлы недостаточной и избыточной прочности.

Динамические испытания проводят для различных конструктивных элементах с целью получения значений обобщенной жесткости и коэффициентов демпфирования, проверки усталостной прочности, исследования поведения конструкций в условиях нестационарного нагружения.

В результате выполненного комплекса исследований уточняется конструктивное исполнение, корректируется конструкторская документация, определяются фактические значения массовых характеристик и дополняются или изменяются требования к производству.

После завершения разработки конструкторской документации продолжают экспериментальную отработку конструкций и технологии их производства. Для этого изготавливается определенное число натуральных агрегатов для прочностных испытаний, отработки технологии, проверки отдельных систем на функционирование и т.д. Задачи испытаний на этом этапе те же, что и на предшествующем, но носят контрольный характер. По результатам КДИ (конструкторско-доводочных испытаний) вносятся изменения в конструкторскую документацию, корректируются характеристики машин в целом, уточняется технологическая документация на изготовление образцов.

При контрольно-выборочных испытаниях (КВИ) отдельные экземпляры узлов доводятся до разрушения, поэтому при этих испытаниях можно оценить запас прочности. Данные испытания гарантируют, что при стабильном технологическом процессе коэффициент безопасности, заложенный в конструкции, будет реализован.

Различают контрольно-выборочные испытания (КВИ) от партии, периодические и установочные. Испытаниям от партии подвергаются отдельные детали и простые сборки (болты, тяги и т.д.) от одной до нескольких штук из партии. Периодическим испытаниям подвергаются сравнительно сложные конструктивные элементы (узлы, агрегаты) для подтверждения стабильности технологического процесса во времени.

## **1.2. Классификация испытаний**

Испытания гидроприводов целесообразно классифицировать следующим образом: по целям и видам испытаний; по темпу проведения; по видам воспроизводимых повреждений; по способам испытаний; по выбранным критериям предельного состояния; по планам испытаний (табл. 1.1).

Предварительным, приемочным, периодическим и типовым испытаниям в производственном процессе должны подвергаться все базовые модели и модификации изделий гидропневмооборудования. При этом приемо-сдаточным испытаниям подвергается каждое изделие; периодическим и типовым - несколько изделий (в зависимости от годового объема выпуска). Объем типовых испытаний устанавливается по согласованию между организацией - разработчиком и предприятием - изготовителем.

Перед проведением предварительных, приемочных и типовых испытаний проверяется соответствие деталей и сборочных единиц гидропневмоустройств рабочим чертежам. Проводится также микрометраж основных деталей.

**Функциональные испытания.** В начале испытаний изделий гидропневмооборудования производят проверки функционирования, прочности и герметичности.

Проверку функционирования производят по основным показателям в зависимости от типа устройства.

Проверке прочности подвергаются все полости агрегатов, в которых во время функционирования возможно создание избыточного давления. Давление при этом устанавливают не менее чем в 1,5 раза больше  $P_{ном}$  с выдержкой не менее 3 мин. Потение наружных поверхностей и течи по резьбе и разъемам не допускаются. В таком же режиме проводится проверка наружной герметичности. Испытания должны проводиться после выполнения не менее пяти полных рабочих циклов.



При приемо-сдаточных испытаниях насосов и гидромоторов должны контролироваться, кроме вышеперечисленных параметров, также такие как подача, рабочий объем, КПД, мощность, давление на входе, уровень звука и масса. Ресурс проверяется при периодических испытаниях. При испытаниях гидромоторов дополнительно контролируются максимальная и минимальная частота вращения, крутящий момент, время реверса. Насосы, входящие в объемные гидропередачи и комплектуемые с гидромоторами, допускается испытывать совместно с гидромоторами. При этом показатели определяются для гидропередачи в целом. При такого вида испытаниях гидроаппаратов управления направлением расхода (направляющие гидрораспределители, гидроклапаны), управления давлением (гидроклапаны) и управления величиной расхода (гидродроссели, регуляторы расхода, делители, сумматоры) проверяются показатели функционирования, наружная и внутренняя герметичность, плавность регулирования, диапазон настройки, зависимость изменения давления настройки от расхода  $P=f(Q)$ , изменение редуцированного давления при изменении давления на входе  $P_{ред}=f(P_{вх})$  и расхода  $P_{ред}=f(Q)$ , минимальный допустимый расход.

Приемо-сдаточные испытания гидроцилиндров предполагают проверку функционирования, прочности, наружной герметичности, давления страгивания и холостого хода, неравномерность перемещения и плавность торможения.

Испытания пневмоприводов включают проверки тех же параметров, что и для гидроприводов. Предварительные испытания предполагают дополнительные проверки шумовых характеристик и содержание воды в рабочем теле (воздухе).

Во всех случаях испытаний гидropневмоприводов следует соблюдать требования безопасности, установленные стандартами и нормативными документами.

В процессе серийного производства гидро- и пневмоприводов проводят их периодические и типовые испытания. Для периодических испытаний выбираются изделия из прошедших приемо-сдаточные испытания. Периодичность проведения таких испытаний устанавливается стандартами и техническими условиями на конкретные изделия в зависимости от количественного выпуска.

Типовые испытания проводятся обычно на предприятии-изготовителе с участием организации-разработчика, если вносятся изменения в конструкцию или технологию изготовления.

Таблица 1.1 – Виды и особенности испытаний

Объект испытаний	Вид испытаний	Основные оцениваемые параметры	Способы, планы испытаний
1	2	3	4
Гидропневмопривод в целом	предварительные	Общетехническое состояние	Обкаточные (приработка)
	функциональные	мощность, виброакустические характеристики, быстродействие, плавность движения выходного звена, рабочие параметры	в номинальном режиме, по состоянию
	ресурсные	ресурс, температурный режим, рабочие параметры как функция времени	по наработке, по состоянию, климатические
	эксплуатационные	общетехническое состояние, надежность, ремонтпригодность	обкаточные, в номинальном режиме, ускоренные, по наработке
	стендовые (лабораторные, модельные)	общетехническое состояние, герметичность, виброакустические характеристики, быстродействие, плавность движения выходного звена, рабочие параметры, ресурс, температурный режим, надежность	в номинальном режиме
	приемочные (сдаточные)	рабочие параметры - общетехническое состояние	в номинальном режиме
	периодические	рабочие параметры - соответствие ТУ	в номинальном режиме, ускоренные
	типовые	рабочие параметры - влияние конструктивных и технологических изменений	в номинальном режиме, ускоренные, специальные

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
Насос	предварительные	рабочий объем (подача), давление, частота вращения вала, герметичность	обкаточные (приработка)
	функциональные	рабочие параметры, регулировочные диапазоны, виброакустические характеристики	в номинальном режиме, по состоянию
	ресурсные	ресурс, надежность, температурный режим, рабочие параметры как функция времени, КПД	в номинальном режиме, ускоренные, по наработке, по состоянию
	эксплуатационные	общетехническое состояние, ремонтпригодность	по наработке, по состоянию, климатические, обкаточные
	стендовые (лабораторные, модельные)	общетехническое состояние, герметичность, виброакустические характеристики, рабочие параметры, время реверса, ресурс, пульсация давления, давление на входе, диапазон регулирования подачи, надежность	в номинальном режиме, ускоренные, по наработке, по состоянию, климатические, специальные
	приемочные (сдаточные)	рабочие параметры - соответствие ТУ	в номинальном режиме
	периодические	рабочие параметры - соответствие ТУ	в номинальном режиме, ускоренные
	типовые	рабочие параметры - влияние конструктивных и технологических изменений	в номинальном режиме, ускоренные, специальные

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
гидромотор, гидроцилиндр	функциональные	рабочие параметры, виброакустические и регулировочные характеристики, максимальная и минимальная частота оборотов, быстродействие, плавность движения выходного звена	в номинальном режиме, по состоянию
	предварительные	общетехническое состояние, герметичность	обкаточные, (приработочные)
	ресурсные	ресурс, рабочие параметры как функция времени	в номинальном режиме, ускоренные, по ресурсу, по состоянию
	эксплуатационные	общетехническое состояние, надежность, ремонтпригодность	по наработке, по состоянию, климатические, обкаточные
	стендовые (лабораторные, модельные)	рабочие параметры, виброакустические и регулировочные характеристики, температурный режим, ресурс, КПД, быстродействие, плавность движения выходного звена	в номинальном режиме, климатические, специальные
	приемочные (сдаточные)	рабочие параметры - соответствие ТУ	в номинальном режиме
	периодические	рабочие параметры - соответствие ТУ	в номинальном режиме, ускоренные
	типовые	рабочие параметры - влияние конструктивных и технологических изменений	в номинальном режиме, ускоренные, специальные

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
распределительная и контрольно-регулирующая аппаратура	ресурсные	ресурс (наработка), рабочие параметры и характеристики как функция времени	в номинальном режиме, ускоренные, по наработке, по состоянию
	предварительные	общетехническое состояние, герметичность	обкаточные, (приработочные)
	функциональные	рабочие параметры, время реверса, регулировочные характеристики и режимы настройки, герметичность, время и давление срабатывания	в номинальном режиме, по состоянию
	эксплуатационные	общетехническое состояние, надежность, ремонтпригодность	по наработке, по состоянию, климатические обкаточные
	стендовые (лабораторные, модельные)	рабочие параметры, регулировочные характеристики, ресурс, время реверса, плавность регулирования и диапазоны настройки, динамические характеристики	в номинальном режиме, ускоренные, климатические, специальные
	приемочные (сдаточные)	рабочие параметры - соответствие ТУ	в номинальном режиме
	периодические	рабочие параметры - соответствие ТУ	в номинальном режиме
	типовые	рабочие параметры - влияние конструктивных и технологических изменений	в номинальном режиме, ускоренные, специальные

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
фильтры и агрегаты функционирования рабочей жидкости и воздуха	ресурсные	ресурс, прочность	в номинальном режиме, ускоренные, по наработке, по состоянию
	предварительные	общетехническое состояние, герметичность	в номинальном режиме
	функциональные	рабочие параметры, перепад давления, прочность, герметичность	в номинальном режиме, по состоянию
	эксплуатационные	общетехническое состояние, надежность, ремонтпригодность	по наработке, по состоянию, климатические
	стендовые (лабораторные)	рабочие параметры и характеристики, ресурс, химическая совместимость с рабочими жидкостями	в номинальном режиме, ускоренные, специальные
	приемочные (сдаточные)	рабочие параметры соответствие ТУ	в номинальном режиме
	периодические	рабочие параметры и характеристики - соответствие ТУ	в номинальном режиме, ускоренные
	типовые	рабочие параметры, ресурс и характеристики - влияние конструктивных и технологических изменений	в номинальном режиме, ускоренные, специальные

Окончание табл. 1.1

1	2	3	4
Рабочие жидкости	лабораторные	рабочие характеристики, совместимость, токсичность, пожароопасность	в номинальном режиме, ускоренные, специальные
	функциональные	рабочие характеристики	в номинальном режиме
	эксплуатационные	ресурс, динамика загрязнений	в эксплуатационных режимах
Трубопроводы и арматура	эксплуатационные	общетехническое состояние, герметичность, ресурс	в эксплуатационном режиме
	стендовые	ресурс, прочность, виброакустические характеристики, герметичность	в номинальном режиме, ускоренные, специальные

**Исследовательские испытания.** Испытания гидропневмоустройств на долговечность обычно называют ресурсными. При этом, как правило, воспроизводятся эксплуатационные условия, режимы испытаний и нагруженность. В результате оценивается долговечность, безотказность и ремонтпригодность. Основные способы виды ресурсных испытаний соответствуют приведенной выше классификации (табл. 1.1).

Все виды ресурсных испытаний можно представить в виде трех групп: ресурсные испытания на стадии создания, доводки и модернизации устройств (предварительные, доводочные, приемочные); контрольные - для подтверждения технических характеристик в процессе серийного производства; исследовательские.

Все свойства устройств окончательно проверяются, подтверждаются и проявляются, конечно, в эксплуатации.

Для ускорения получения необходимой информации применяют ускоренные ресурсные испытания. Ускорение может достигаться за счет более высоких значений режимных, климатических, цикловых и др. параметров. Применение ускоренных ресурсных испытаний экономически выгодно и, самое главное, сокращает сроки освоения новой техники. Конечно, им должны предшествовать этапы

исследований, которые позволяют обосновать идентификацию результатов.

Исследовательские испытания присущи всем стадиям создания и эксплуатации машин и механизмов. Они предназначены для изучения свойств объектов, факторов и условий, влияющих на их работоспособность и надежность. Основными целями исследовательских испытаний являются:

- оценка значений показателей качества функционирования испытуемого устройства в определенных условиях его применения;
- определение наилучших режимов применения устройства (системы) или наилучших его характеристик;
- сравнение вариантов и аналогов устройств при их проектировании и аттестации;
- построение математической модели устройств;
- определение и ранжирование факторов, оказывающих влияние на функционирование устройства.

Основными типами исследовательских испытаний (экспериментов) являются следующие:

- определительные, проводимые в заданных условиях (режимах) с целью оценки показателей качества функционирования устройства в этих условиях;
- сравнительные, проводимые с целью сравнения показателей качества двух или более устройств;
- идентифицирующие, проводимые с целью построения математической модели устройства;
- экстремальные, проводимые с целью выбора наилучших режимов применения устройства или наилучших его характеристик;
- отсеивающие, проводимые с целью отбора факторов, в наибольшей степени влияющих на качество функционирования устройства.

Исследовательские испытания могут носить и многоцелевой характер, а их объектами могут быть опытные образцы новых устройств, серийные изделия, модернизированные и отремонтированные устройства.

Доводочные и исследовательские испытания предназначены для решения следующих задач: устранение конструктивных и технологических недостатков, выявленных на опытных образцах новых машин и механизмов до начала их серийного производства, а также недостатков, выявленных в процессе испытаний и



эксплуатации серийно выпускаемых устройств; совершенствование (модернизация) серийных устройств с целью повышения их качества, расширения функциональных возможностей, снижения массы и стоимости; создание новых конструкций устройств на базе серийно выпускаемых. Требуемый результат от решения поставленных задач достигается в процессе доводки путем последовательных введений усовершенствований и экспериментальных проверок.

Доводочные и исследовательские испытания продолжаются и после начала серийного производства приводов и устройств. Они теперь направлены на устранение недостатков, которые не были выявлены при испытаниях опытных образцов и которые могли появиться как результат отличия технологий опытного и серийного производств.

Широкое развитие поэлементных стендовых испытаний в общем комплексе всех видов испытаний позволяет значительно сократить длительность доводки новых приводов.

Как уже было отмечено выше, совершенствование машин и механизмов производится постепенно, на всех стадиях их создания и эксплуатации. С этой целью широко применяют исследовательские испытания.

Процессы доводки комплектных машин и механизмов протекают на протяжении сравнительно небольших промежутков времени, ограниченных периодами подготовки привода или машины к производству и их серийного выпуска. Наряду с этим происходит длительный процесс совершенствования большой группы типовых элементов (насосов, аппаратуры, машин и механизмов и т.п.). Улучшенные технические параметры элементов позволяют расширять функциональные возможности комплектных приводов и комплектуемых ими машин. Так, известно, что усовершенствованная элементная база позволила разработать новые гидроприводы для энергонасыщенных тракторов МТЗ. Они позволили осуществить централизацию многих рабочих функций, автоматическое регулирование чувствительности к нагрузкам, отбор значительной части мощности для внешних потребителей и ряд других отсутствующих на предыдущих моделях возможностей.

Особо следует подчеркнуть значение доводочных и исследовательских испытаний в вопросах повышения эффективности новых машин и их положительной оценки потребителями. Известны случаи, когда заводы приступали к серийному выпуску машин и

механизмов, основываясь на поверхностной экспериментальной проверке их свойств. В этих случаях доводка продолжалась в эксплуатации путем, так называемого экспериментирования на потребителе. Убытки от простоев, ремонтов и устранения дефектов в условиях эксплуатации во много раз превышали затраты на правильно организованную доводку до начала серийного производства машин. Внесение изменений в конструкцию или технологию изготовления приводов в ходе их серийного выпуска вызывает серьезные трудности в работе заводов-изготовителей. Кроме того, это не способствует хорошей репутации новой модели машины (как правило, прогрессивной и эффективной в принципе).

Таким образом, можно смело утверждать, что доводочные и исследовательские испытания являются одним из основополагающих этапов, определяющих технический прогресс в конкретной отрасли машиностроения.

При ресурсных испытаниях определяется также приспособленность машин и механизмов к техническому обслуживанию и ремонту. Эффективность и стоимость ремонтных работ во многом определяются надежностью машин и механизмов. Для получения информации о надежности, как для новых изделий, так и для отремонтированных, проводят испытания приводов на долговечность и эксплуатационные наблюдения. При ресурсных испытаниях отремонтированных устройств могут решаться задачи определения оптимальной последовательности ремонтов, обоснования предельных износов деталей и сопряжений, а также устанавливаться границы их рационального использования.

Ускоренные стендовые и полигонные испытания позволяют эффективно выявлять производственные дефекты, влияющие на надежность. При соблюдении методических правил лабораторные и полигонные испытания дают обширную и достоверную информацию о надежности машин и механизмов гораздо быстрее и раньше, чем эксплуатация. Когда информация, полученная при данных испытаниях, не является исчерпывающей, то она должна дополняться результатами последующих эксплуатационных испытаний.

## ТЕМА 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Методы измерений при испытаниях устройств предполагают использование измерительных приборов, прошедших метрологическую проверку в соответствии с действующими правилами и инструкциями Госстандарта. Класс точности измерительных приборов определяется допустимой погрешностью измерения при испытаниях в соответствии с Государственными стандартами (ГОСТ). Если величина измеряемого параметра имеет разброс, выходящий за пределы допускаемых погрешностей прибора, то проводятся повторные измерения, и число их определяется по правилам математической статистики.

Обычно в качестве результата измерения принимается среднее арифметическое не менее трех измерений.

### 2.1. Измерение давления рабочей жидкости

Избыточное давление рабочей жидкости в гидросистеме и воздуха (газа) в пневмосистеме измеряют манометрами различного конструктивного исполнения. Каждый манометр содержит чувствительный элемент (датчик). В современной измерительной аппаратуре широкое распространение получили двухступенчатые датчики, в которых гидравлическое давление преобразуется на первой ступени в механическое перемещение, усилие и т.п., а затем - в электрический сигнал. При этом в качестве первичных преобразователей используют мембраны, сильфоны, поршни и др. чувствительные элементы. В качестве генераторов электрических сигналов используются датчики сопротивления, индуктивные, частотные и пьезоэлектрические.

Для измерения разрежения (вакуумметрического давления) на отдельных участках гидросистем применяются вакуумметры и мановакуумметры, как жидкостные (с U - образными стеклянными трубками), так и механические, с упругими чувствительными элементами.

При измерении пульсирующих давлений приборы укомплектовываются гасителем пульсаций, который не должен искажать показания.

В пневмоприводах давление воздуха измеряется манометрами, вакуумметрами (для вакуумметрического давления) и мановакуумметрами, тягомерами, напоромерами [1].

Дифференциальными манометрами, дифманометрами-тягомерами измеряется разность давлений.

## 2.2. Измерение потока (расхода) жидкости (воздуха)

Известны два метода измерения расхода: прямой и косвенный.

Прямой метод измерения потока жидкости (воздуха) - это непосредственное измерение потока жидкости (воздуха) приборами. В табл. 2.1 приведены основные характеристики измерительных приборов для жидкостей.

Таблица 2.1 – Основные характеристики расходомеров

Наименование измерительных приборов	Класс точности измерительных приборов	Диапазон измерения потока жидкости, м <sup>3</sup> /с	Максимально допустимое давление		Примечание
			МПа	кгс/см <sup>2</sup>	
Тахометрические крыльчатые расходомеры	0,2-1; 0,5-1	0,07-0,7 1,5·10 <sup>-3</sup> –2,5·10 <sup>-4</sup>	20	200	–
Тахометрические шариковые расходомеры ГСП по ГОСТ 14012-68	1,0; 1,6; 2,5	10 <sup>-4</sup> – 0,5	16	160	Применять при вязкости менее 12 мм <sup>2</sup> /с (сСт)
Расходомеры переменного перепада давления, состоящие из сужающих устройств и дифманометров по ГОСТ 18140-72	1,0; 1,5	-	100	1000	Применять при диаметре условного прохода D <sub>y</sub> не менее 50 мм и скорости течения жидкости не более 5 м/с
Ультразвуковые расходомеры	1-2	3·10 <sup>-3</sup> – 5,5·10 <sup>6</sup>	1	10	-

Для прямых измерений потока воздуха применяют расходомеры переменного перепада давления, состоящие из сужающих устройств и дифманометров, а также общепромышленные ротаметры [1].

Косвенные методы основаны на применении объемных, массовых способов. В качестве расходомеров используют также гидромоторы. Способ заключается в измерении времени заполнения мерного сосуда или протекания жидкости (воздуха) через счетчик. В табл. 2.2 приведены характеристики применяемых приборов для измерения потока жидкости косвенным методом.

Таблица 2.2 – Приборы для измерения расхода жидкости косвенным методом

Наименование измерительных приборов	Относительные погрешности	Диапазон измерения потока жидкости, м <sup>3</sup> /с	Максимально допустимое давление		Примечание
			МПа	кгс/см <sup>2</sup>	
Меры вместимости стеклянные технические по ГОСТ 1770-64	-	-	0	0	Вместимость составляет от 5 до 2 дм <sup>3</sup>
Металлические технические мерники	±0,2; ±0,5	-	16	160	Вместимость составляет от 0,5 до 50 дм <sup>3</sup>
Стационарные мерные баки	±0,5; ±1	-	0	0	-
Счетчики жидкости с овальными шестернями по ГОСТ 12671-71	±0,5	3·10 <sup>-3</sup> – 6·10 <sup>-2</sup>	4	40	-
Счетчики жидкости кольцевые по ГОСТ 14684-69	±0,2; ±0,5	3·10 <sup>-4</sup> – 3·10 <sup>-1</sup>	4	40	-

Поток жидкости (воздуха) подсчитывается по формуле:

$$Q = \frac{V}{t},$$

где  $V$  - измеренный объем жидкости (воздуха), м<sup>3</sup>(дм<sup>3</sup>);  $t$  - время заполнения мерного сосуда при протекании рабочей жидкости (воздуха) через счетчик, с.

Массовый способ состоит в измерении массы жидкости взвешиванием на весах при одновременном измерении времени заполнения этой массой емкости, установленной на весах, и измерении плотности жидкости денсиметрами или пикнометрами. Поток жидкости подсчитывается по формуле:

$$Q = \frac{m}{t \cdot \rho},$$

где  $m$  - масса жидкости, кг;  $t$  - время заполнения жидкостью емкости, установленной на весах, с;  $\rho$  - плотность жидкости, кг/см<sup>3</sup>.

Таблица 2.3 – Измерители крутящего момента

Наименование измерительных приборов	Относительности погрешности, %	Диапазон измеряемого момента		Частота вращения	
		Нм	кгс м	с <sup>-1</sup>	об/мин
1. Торсионные:					
а) крутильные стробоскопические	±1	до 5	0,5	до 200	до 12000
б) крутильные электрические с использованием временного метода измерения крутящего момента	±0,5-±2	1 - 3000	0,1 - 300	1-10	60 -600
в) крутильные электрические с использованием фазового метода измерения крутящего момента	±0,5 - ±1	5-400	0,5-40	50 - 600	3000 - 36000
г) крутильные индуктивные	±1 - ±2 ±1,5	до 8000 250 - 7500	до 800 25 - 750	до 1000 до 5	до 60000 до 300
д) тензометрические с магнитоупругим преобразователем					
е) тензометрические омические	±1,5	100-200	10-20	до 50	до 3000
2. Балансирные динамометры					
а) электрические постоянного тока в двигательном и генераторном режимах	±0,1-±0,2	До 5000	До 500	10-60	60 - 3600
б) электрические переменного тока в двигательном и генераторном режимах	±0,2 -±0,5	до 100	до 10	до 100	до 6000
в) гидравлические тормозные	от ±0,1	до 10000	до 100000	3-1000	180- 60000
г) механические тормозные	±1 - ±5	до 2000	до 200	до 30	до 180
д) электромагнитные тормозные	±0,5 - ±2	до 2000	до 200	до 30	до 1800

При использовании гидромотора в качестве расходомера измеряют частоту вращения гидромотора, а поток жидкости  $Q$  подсчитывают по формуле:

$$Q = V_0 \cdot n,$$

где  $V_0$  — рабочий объем гидромотора, м<sup>3</sup>/об;  $n$  - частота вращения

гидромотора,  $c^{-1}$ . Данный метод используют при измерении потока на сливном участке гидросистемы. Измерение частоты вращения (числа оборотов) производится с помощью тахометров и тахоскопов. Измерение крутящего момента предполагает применение торсиметров и балансирных динамометров. Приборы, применяемые при измерении крутящего момента, перечислены в табл. 2.3.

### **2.3. Измерение мощности**

Мощность измеряют косвенными методами: методом измерения частоты вращения и крутящего момента или методом нагрузки тарированной машиной. Для измерений используются ваттметры класса точности не ниже 0,5; измерительные трансформаторы класса точности не ниже 0,2; амперметры и вольтметры класса точности выше 0,5. При ресурсных испытаниях используются самопишущие ваттметры.

Нагрузочная тарировочная машина имеет известную зависимость КПД от величины потребляемой или эффективной мощности при оговоренных условиях измерений и окружающей среды.

Существует понятие гидравлической мощности. Это произведение расхода рабочей жидкости в единицу времени через контролируемое сечение исследуемого гидропривода на развиваемое в сечении давление. Для получения мгновенных значений гидравлической мощности в сечении гидропривода используют турбинно-тахометрические датчики расхода с импульсно-аналоговыми преобразователями в сочетании с тензометрическими или потенциометрическими датчиками давления. Сигнал от вторичного прибора выдается на индикатор гидравлической мощности.

### **2.4. Измерение параметров шумовых характеристик**

Для измерения вибраций и шума применяется различная виброакустическая аппаратура. Так, известен измерительный комплекс датской фирмы «Брюль и Кьер». При измерениях датчик вибраций устанавливают на испытуемый агрегат, в определенное место. В качестве виброакустического датчика не пользуются пьезодатчик, сигнал от которого через усилитель подается на преобразователь, а затем на регистрирующую аппаратуру

В практике испытаний гидропневмоприводов применяется прибор ЭМДП-3. Он позволяет измерять общий уровень вибраций, частоту вращения вала, температуру среды, а также обеспечивает прослушивание шумов в отдельных узлах. Для прослушивания шумов в узлах гидро- и пневмоприводов используется стетоскоп КИ-1154.

### **2.5 Измерение объема (емкости)**

Объем измеряют путем заполнения жидкостью полости, объем которой измеряется, и измерения объема этой жидкости с помощью стеклянных технических мер при объеме до 2 дм<sup>3</sup>. Также объем измеряют методом вычисления по измеренным линейным размерам.

### **2.6. Измерение времени**

Время измеряют механическими секундомерами и хроноскопами, электронносчетными хронометрами, стробоскопическими хроноскопами, электромеханическими секундомерами, методом осциллографирования.

### **2.7. Измерение температуры**

Температуру рабочей жидкости и воздуха измеряют лабораторными и техническими термометрами (ртутными, спиртовыми и др.). Применяют также электроконтактные термометры. Кроме того, при испытаниях и в промышленных установках используются термометры манометрические классов точности от 0,6 до 2,5; термометры сопротивления типа ТСМ; термопары в комплекте с милливольтметрами или потенциометрами.

## **ТЕМА 3. РЕГИСТРИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА**

Для регистрации данных испытаний используют приборы: магнитографы, осциллографы, самописцы, цифропечатающие устройства и приборы.

В магнитографах выходной сигнал воспроизводится в электрической аналоговой форме. Они обладают возможностью обработки высококачественных процессов с продолжительным периодом времени регистрации. Магнитограф предназначен для магнитной записи сигналов в аналоговой форме от тензорезисторов с использованием частотно-импульсной модуляции сигналов. Для оперативной проверки основных параметров блоков записи и



воспроизведения выходных усилителей и блока питания в магнитографе имеется блок контроля, в котором установлен индикатор перегрузок, подключаемый по выбору к любому каналу передачи данных. С целью снижения погрешности при перезаписях с одного канала на другой и с одного магнитографа на другой предусмотрена возможность перезаписи сигнала непосредственно в частотно-импульсной форме.

Осциллографы используются при тензометрировании машин и механизмов в самых различных условиях и поэтому получили наиболее широкое распространение в технике тензометрирования динамических процессов. Погрешность осциллографирования лежит в пределах от 1% до 5%. При помощи осциллографов можно одновременно записывать в широком диапазоне частот целый ряд исследуемых параметров, что позволяет упростить их анализ и сопоставлять по времени.

Электронно-лучевые осциллографы применяются для регистрации и исследований высокочастотных процессов – гидроудара, кавитации.

Вместо светолучевых осциллографов можно использовать самопишущие приборы, выполняющие непосредственную запись на бумажный носитель.

Цифропечатающие устройства получили в современных условиях наибольшее распространение. Они позволяют выполнять многоточечное тензометрирование при статических и квазистатических процессах.

#### **ТЕМА 4. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ (ИИС) И ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ (ИВК)**

Существует много возможностей использования компьютеров в зависимости от ситуаций, а также степени автоматизации процесса и системы диагностирования.

Использование компьютерной техники позволяет ускорить реализацию процесса диагностирования, оптимизировать программу испытаний, а также оптимизировать период проведения профилактических работ. Самое простое и одновременно эффективное применение компьютера в процессе испытаний - это использование с целью обработки результатов эксперимента. Эле-

ментом, связывающим компьютер с элементами гидропневмосистемы, является оператор. Сначала с помощью соответствующих контрольно-измерительных устройств воздействуют на подсистемы (либо элементы систем) и получают сведения об их состоянии, а затем полученные данные с помощью клавиатуры вводят в компьютер.

На мониторе считывают частичные либо конечные диагностические заключения как результат выполнения заданных расчетных программ. Блок-схема информационно-измерительной системы, использующей компьютер, представлена на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Схема информационно-измерительной системы с использованием компьютера

В рамках упомянутых программ компьютер может выполнить следующие операции:

- 1) сравнивать полученные результаты замеров с контрольными значениями;
- 2) преобразовывать результаты замеров в другую форму;

- 3) накапливать результаты замеров как статистические данные и обрабатывать их;
- 4) способствовать определению диагноза;
- 5) представлять полученные результаты в виде графиков, гистограмм и т.п.

Основными преимуществами этого способа использования компьютера в испытаниях и исследовательских целях являются:

- освобождение оператора от необходимости запоминания (либо поиска в инструкциях) различного рода данных, что уменьшает вероятность субъективных ошибок и постановки ошибочных диагнозов;

эффективное сокращение продолжительности процесса испытаний;

исключение субъективных выводов и оценок, а также последовательная регистрация данных, что существенно влияет на достоверность результатов.

Использование компьютера в такой структуре системы испытаний и исследований требует разработки соответствующего программного обеспечения и не связано с изменениями в измерительной оснастке, сети соединений и т.п. Компьютеризация позволяет гибко использовать имеющуюся контрольно-измерительную аппаратуру в различных целях путем изменения программы. Это полезно в случае, когда часто меняются объекты либо требования. Если возникает необходимость многократного испытания одного типа гидропривода, целесообразно свести информационно-измерительную систему к микропроцессорному устройству. Основным элементом такого устройства является - микропроцессор, управляемый программой, введенной в память. В соответствии с этой программой микропроцессор управляет:

- прохождением данных с объекта испытаний;
- преобразованием данных;
- накоплением результатов в памяти компьютера;
- генерацией сигналов (в зависимости от значений данных, управляющих ходом процесса испытаний);
- отображением полученных сведений в форме, удобной пользователю (в виде светового или звукового сигнала, распечатки данных, графика на дисплее и т.п.).

Для реализации упомянутых задач микропроцессорное устройство должно содержать часть элементов, которыми оснащается компьютер либо компьютеризованная система. Ими являются,

например, буферные усилители, системы параллельных входов и выходов, оперативная память, измерительные приборы.

Применение микропроцессорных систем имеет особенно большое значение в ситуации, когда необходимо контролировать величины во многих точках объекта испытаний.

На рис. 4.2 представлена схема прохождения сигналов, которые имеют место в системах электронного регулирования гидропневмопривода машин и используются при диагностировании гидропневмоприводов.



- - - электрические сигналы; --- механические сигналы;  
 ---гидравлические сигналы

Рисунок 4.2 – Блок-схема системы прохождения сигналов гидропневмоприводов

Контроллеры служат оператору для преобразования его действий в электрические сигналы. Контроллеры - это устройства, активизируемые оператором с помощью рычага, колеса либо педали,

посылающие электрические сигналы, пропорциональные отклонению указанных управляющих элементов. Чаще они действуют по принципу потенциометров.

Электрические сигналы передаются к электронному регулятору. Электронные регуляторы являются устройствами, которые могут работать в закрытых системах реагирования с обратной связью. Они позволяют программировать процесс управления. Регулятор анализирует поступающие в него электрические сигналы и направляет их в электрические преобразователи. Электрические преобразователи построены по принципу электрогидравлических сервоклапанов и пропорциональных клапанов, образующих электрически управляемые клапаны давления и расхода и другие.

В преобразователях электрические сигналы преобразуются в гидравлические величины (давление и расход жидкости), которые затем передаются в гидромеханические преобразователи.

Гидромеханические преобразователи построены в виде гидравлически: двигателей с вращательным либо возвратно-поступательным движением, преобразующих гидравлическую энергию в механическую (усилие и линейная скорость либо момент и угловая скорость).

Из гидромеханических преобразователей механическая энергия передается рабочим элементам машины, приводя их в движение.

Параметры движения машины измеряются непрерывно датчиками реальных значений, которые преобразуют механические сигналы (силу, момент, скорость) в соответствующие электрические сигналы, передаваемые затем электронному регулятору. Регулятор сравнивает их с заданными значениями, полученными от оператора через контроллеры, и корректирует, в случае необходимости, ошибки с помощью сигналов, передаваемых к электрогидравлическим преобразователям.

Те же сигналы используются в процессе испытаний и диагностирования состояния определенных элементов гидравлической системы. В этом случае в гидравлических системах машин вместо электронных регуляторов используются так называемые микроконтроллеры - они содержат микропроцессоры памяти, позволяющие программировать и контролировать процессы управления, построенные в цифровом исполнении.

Простейшей разновидностью компьютеров являются диагностические портативные компьютеры - тестеры, используемые

преимущественно в виде переносных диагностических комплектов. Ввиду простой конструкции и универсальности (один и тот же тестер может быть использован для контроля гидравлических систем различных машин) тестеры являются наиболее часто используемой группой контрольных устройств. Схема такого компьютера представлена на рис. 4.3.



Рисунок 4.3 – Схема контрольного компьютера с радиальной структурой

Имеются две разновидности контрольных (диагностических) компьютеров:

1. С комплектом датчиков и преобразователей. Требуют приспособления отдельных подсистем к диагностированию уже на этапе конструирования рабочей машины. Например, в гидравлической системе должны быть предусмотрены места установки расходомеров, датчиков и т. п.

2. Компьютеры, присоединяемые к так называемым диагностическим гнездам. Датчики и преобразователи представляют единое целое с подсистемами рабочей машины и вмонтированы в гидравлическую систему. Электрические сигналы передаются к диагностическому разъему, к которому извне подключается портативный диагностический компьютер.

Диагностические компьютеры (тестеры) являются специализированными устройствами, и их можно использовать для диагностирования состояния определенных агрегатов и подсистем

гидроприводов машин. Поэтому они чаще всего имеют радиальную структуру.

Принцип действия портативных диагностических компьютеров основан на преобразовании измеряемой физической величины (давления, расхода, температуры, скорости и т. п.) в электрический ток. Это преобразование происходит в измерительных датчиках, сопряженных с преобразователями. Затем электрический сигнал формируется в вид, соответствующий входам аналогово-цифровых преобразователей либо непосредственно цифровым входам. Процесс формирования может совершаться уже в преобразователях, сопряженных с измерительными датчиками в относительно специализированных согласующих системах. Цифровая форма измеряемой физической величины преобразуется в микрокомпьютере в соответствии с алгоритмом (компьютерной программой), предварительно введенным в память компьютера.

Блок-схема портативного диагностического компьютера представлена на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Блок-схема портативного компьютера (тестера)

Достоинствами портативных компьютеров являются:

- малые размеры, иногда такие компьютеры имеют размер калькулятора;
- производительность, а также возможность регистрации и учета значений временных переходных процессов;
- автоматическая, без участия обслуживающего персонала,

реализация сложных действий, связанных с измерениями и вычислениями;

- селективный отбор сведений, доставляемых пользователю в удобной для восприятия форме;

- высокая безотказность работы и достоверность результатов;

- объективность диагнозов, независимая от квалификации, численности и концентрации внимания персонала.

Недостатком тестеров является их узкая «специализация», т. е. одни тестеры используются только для диагностирования гидрооборудования, другие - только для диагностирования электрооборудования машин и т. п.

Другую, более сложную, разновидность компьютеров составляют бортовые компьютеры, исполняющие информационно-диагностические функции (телеоника). Назначение заключается в информировании оператора, например, об объеме выполненной работы, количестве израсходованного топлива, а также о таких чувствительных параметрах подсистем машины, как рабочие параметры двигателя внутреннего сгорания, гидравлической системы и т. п. Эти компьютеры встроены в пульт оператора.

Бортовые компьютеры, ввиду их значительно больших возможностей (информационных, управляющих), имеют магистральную структуру (рис. 4.5).



ЛСУ. - локальные системы управления СИА. - средства измерения и автоматизации

Рисунок 4.5 – Схема компьютера с магистральной структурой



Степень автоматизации бортовых компьютеров может быть различной, причем существенную роль играет выбор контролируемых диагностических параметров, вытекающий из разработанной модели машины, а также критерии оптимизации и дополнительные требования, предъявляемые к диагностической системе пользователем результатов диагноза.

Полностью автоматизированный диагностический компьютер реализует контрольно-измерительный процесс, а такжеставляет конечный диагноз. Используются также варианты, в которых диагностическое устройство формирует только результаты проверок, а определение состояния подсистем гидропневмопривода выполняет оператор. В первом случае диагностический компьютер вместе с процедурами действий составляет диагностическую систему, во втором случае такую систему образует диагностическое устройство и оператор, формулирующий окончательные выводы.

Второй важной подсистемой диагностического компьютера, необходимой для реализации диагностических соотношений, является подсистема запоминания величин отнесения и связанный с ней компьютер, преобразующий результат замера в результат проверки.

Результаты измерений, выполняемых автоматически, должны быть многократными и соответствовать статистическим критериям.

## **ТЕМА 5. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ**

### **5.1. Основные задачи и цели испытаний**

В зависимости от функционального назначения конкретных машин и механизмов могут иметь место различные режимы эксплуатации: непрерывный, циклический, случайный. Для оценки надежности технических в зависимости от условий эксплуатации может применяться один или несколько показателей [1-2].

Одним из основных вопросов производства технических устройств является разработка методов и правил, позволяющих наиболее целесообразно производить испытания их качества. Различают следующие виды испытаний:

- производственные испытания опытных образцов,
- испытания новых образцов техники,
- периодические производственные испытания серийных изделий,
- подконтрольная эксплуатация,
- специальные исследовательские испытания.

Производственные испытания опытных образцов устройств должны проводиться с использованием методики планирования многофакторных экспериментов с целью решения следующих основных задач:

1) Сравнение различных вариантов устройств. Решение задач заключается в получении комплекса выходных параметров, характеризующих устройство в сравнении с устройствами-аналогами.

2) Задачи оценки степени влияния конструктивных, технологических эксплуатационных факторов на качественные показатели устройств. Решение задачи заключается в обоснованном выборе конструктивных параметров, назначении допусков на них, применении прогрессивных технологических процессов, назначении рациональных режимов эксплуатации устройств, обосновании требований на параметры ТУ.

Испытания новых образцов техники проводятся с целью контроля технических характеристик изделий по основным группам показателей:

- а) технические и эксплуатационные свойства;
- б) надежность и долговечность;
- в) технологичность;
- г) степень стандартизации и унификации;
- д) соответствие эстетическим требованиям.

Периодические производственные испытания серийных образцов машин и оборудования должны предполагать применение методов планирования экспериментов с целью решения следующих задач:

1. Оценка работоспособности нового устройства в данных условиях. Решение задачи заключается в определении предельных режимов, оптимальных эксплуатационных параметров и условий использования устройств.

2. Определение (в том числе ускоренное) ресурса технических устройств, основание регламентирующих требований для эксплуатационной и ремонтной документации.

3. Контроль стабильности технологического процесса; проверка устойчивой воспроизводимости параметров устройств во времени.

Весьма важным является условие полноты изучения влияния на надёжность факторов среды с учетом не только их дозировки в интересующих интервалах, но и порядка воздействия.

Подконтрольную эксплуатацию и специальные наблюдения за использованием техники в производственных условиях следует проводить с применением методов планирования экспериментов для:

1) дальнейшей отработки параметров оборудования и установления, обоснованных требований к его модернизации и созданию более совершенных образцов;

2) оценки качества ремонта и технического обслуживания.

При экспериментальных научных исследованиях использовать методы планирования экспериментов с целью решения задач: получения адекватной математической модели устройства или процесса, которую можно использовать для оптимального управления; проверки эффективности новых принципиальных решений в конструировании, технологии, эксплуатации; обоснования методики ускоренной оценки долговечности технических устройств.

## **5.2 Экспериментально-статистические методы исследований надежности и работоспособности**

За основной принцип обеспечения надежности гидропневмоустройств принимается организация испытаний устройств и их отдельных элементов на разработки, освоения серийного производства, в процессе производства и эксплуатации. Методы и планы испытаний разрабатываются применительно к конкретным типам устройств, условиям и задачам.

Надежность технических устройств можно оценить на основании статической обработки результатов испытаний, представительного числа объектов. С учетом того, что возможности оценки надежности ограничиваются недостатком статистических данных, необходимо стремиться к обеспечению максимальной надежности устройств путем повышения качества и эффективности проектирования, а также организации испытаний и производства. Сведение к минимуму источников снижения надежности достигается не путем использования неконкретного коэффициента запаса, а прежде всего путем уменьшения величины разброса характеристик, введения полного контроля, над обработкой и характеристиками материала и улучшения конструкции.

Постановка массовых испытаний технических устройств на долговечность, особенно на стадии опытно-конструкторских разработок, представляю большую техническую трудность. Доводка конструкции обычно осуществляется всего лишь на нескольких образцах.

Для того чтобы в ходе выполнения программы опытно-конструкторских разработок и доводочных испытаний опытных образцов оценить способность машины надежно выполнять рабочие функции, необходимо рассматривать следующие задачи:

1. Возможность получения максимальной информации по надежности устройства в процессе опытно-конструкторских разработок, когда задачи испытаний часто отличаются друг от друга, а конструкция изделия претерпевает непрерывные изменения.

2. Получение удовлетворительных оценок надежности по данным результатов небольшого числа испытаний.

3. Оценка надежности по результатам стендовых испытаний, поскольку на стадии конструкторской разработки и доводки еще не представляется возможным производить эксплуатационные испытания.

Поскольку для испытаний на долговечность обычно выделяется небольшое количество изделий, то для получения достоверных данных по надежности необходимо согласовать цели и задачи обычных технических испытаний с целями испытаний на надежность.

Для количественной оценки надежности и долговечности технических устройств разработан ряд методов:

а) метод оценки надежности устройств при постановке массовых испытаний на долговечность с учетом рассеивания основных показателей;

б) статистический контроль надежности в общем случае ресурсных испытаний опытных образцов машин и оборудования;

в) способы оценки надежности опытных образцов устройств сложной конструкции.

В зависимости от типа исследуемого устройства и особенностей его производства может применяться тот или иной метод.

Применение методов моделирования в исследованиях надежности гидропневмоустройств заслуживает большого внимания, поскольку они сулят целый ряд очень важных преимуществ: быстроту получения результатов, неограниченные возможности варьирования исследуемых параметров, возможность применения строгого математического аппарата и т.д.

Основной недостаток метода заключается в том, что в модели трудно учесть все многообразие эксплуатационных, производственных и прочих факторов, которые оказывают влияние на характеристики исследуемого объекта. По этой причине модели, а

следовательно, и результаты, полученные при их исследовании, являются приближенными.

Следует помнить, что задачи испытаний на долговечность гидропневмоустройств заключаются не только в том, чтобы произвести оценку достигнутого уровня их надежности. Одной из первых и самых основных задач таких испытаний является установление зависимостей и обозначение рациональных программ управления параметром надежности изделий. Информация, получаемая на этапе испытаний, должна использоваться для расчета оптимальных значений основных параметров устройств.

Задачи оптимизации параметров функционирования устройства по выбранному критерию качества при соблюдении ряда ограничений, в принципе, могут быть решены аналитическим методом при условии наличия необходимых моделей. Трудность заключается в том, что созданию аналитической модели изучение очень сложных физических, химических и др. процессов, протекающих в устройствах. Кроме того, при этом необходимо учитывать целый ряд факторов, оказывающих воздействие на протекающие процессы.

Аналитические методы разрабатываются при значительной идеализации протекающих в устройствах процессов и без учета ряда существенных явлений. В связи с этим решение задачи оптимизации параметров устройств в сроки с использованием аналитических методов представляет известную трудность.

С учетом вышеизложенного достаточно эффективными представляются экспериментально-статические методы оптимизации, основанные на математической теории планирования эксперимента. Данные методы позволяют определять оптимальные параметры устройств при не полном знании механизма процессов, происходящих в них.

Математические методы планирования экспериментов позволяют при одновременном изменении всех изучаемых факторов выбирать оптимальные параметры устройств или процессов. Затраты времени и средств на проведение экспериментов с использованием данных методов несравненно меньше, чем при традиционных способах изучения факторов «по одному». Кроме того, при использовании новой методологии значительно выигрывает качество исследований. Ведь в современных сложных технических устройствах метод изменения факторов «по одному» не применим по

существо. Сложные внутренние связи и большая динамичность реальных технических систем обуславливают одновременное изменение всех основных факторов, оказывающих влияние на работоспособность.

Полную информацию об эффекте изменения какого-либо параметра можно получить только при изменении всех остальных параметров, допускаемых условиями работы в диапазонах.

Разрозненное изучение влияния отдельных факторов на работоспособность устройств разными исследователями в разное время приводит также к тому, что не всегда можно воспользоваться результатами их работ. Так, например, один исследователь изучал влияние свойств рабочих жидкостей *A* и *B* (при остальных постоянных условиях) на работоспособность гидравлических узлов и показал, что жидкость *A* лучше. Второй исследователь в другое время исследовал влияние температурного режима в гидравлических системах на работоспособность тех же узлов и показал, что температура 20 °С является оптимальной при использовании жидкости *B*. Значит, если первым исследователем эксперименты производились при температуре 50 °С, то их результаты, с точки зрения второго исследователя, неверны.

В методическом плане при решении задач с помощью методов многофакторного планирования экспериментов предполагается определенная последовательность операций. Вначале можно проводить эксперименты по оценке и выявлению наиболее существенных факторов с целью последующего построения адекватной модели, выражающей зависимость показателей надежности и работоспособности от этих факторов.

### **5.3. Методологическое обеспечение экспериментальных исследований**

Проблема надежности включает в себя весь комплекс проектирования, создания и эксплуатации машины. Отсюда очевидна вся сложность системы многообразия ее структур и связей.

При исследовании работоспособности гидропнеumoустройств, следует одновременно учитывать не поддающиеся разграничению процессы: механические разрушения материалов, химические превращения и их кинетику, гидродинамические и термодинамические процессы, сложные взаимодействия между различными звеньями устройств. Условия протекания процессов а

сильной степени зависит как от внешних воздействий, так и от исполнения устройств и режимов их работы. Опыт исследований показывает, что количественному описанию такие сложные явления не поддаются.

При большом многообразии конструктивных, технологических эксплуатационных и др. факторов, оказывающих влияние на работоспособность технических устройств, поиск оптимального сочетания их до последнего времени не был нормализован и проводился эмпирически традиционным способом, путем перебора воздействующих факторов «по одному». При этом изучение влияния одной какой-либо фактора на рабочие характеристики изделия проводилось при постоянных значениях всех остальных параметров. Такой подход к организации испытаний не позволяет воспроизводить условия, характерные для эксплуатации.

Экспериментальное изучение работоспособности устройств при одновременном изменении воздействующих факторов можно успешно проводить, используя методы математического планирования экспериментов.

Применение экспериментально-статистических методов не исключает разработки аналитических методов. Эти оба подхода могут одновременно использоваться для целей оптимизации параметров гидравлических устройств. При разработке новой техники в ряде случаев предпочтение отдается экспериментальным методам, позволяющим без трудоемких предварительных исследований в минимальные сроки создавать оптимальную конструкцию устройств разрабатывать рациональные методы их использования. Этим требованиям удовлетворяют методы планирования экспериментов. Причем опыт подсказывает, что использование экспериментально-статистических методов оправдано только в случае отсутствия аналитического описания устройства или процесса, но и в том случае, когда имеется разработанная теория процессов, математическое описание. Те неточности, которые обусловлены неизбежными допущениями при разработке теории, могут быть компенсированы при использовании планирования экспериментов для поиска экстремума целевой функции. Большой интерес представляет также использование математического планирования экспериментов для получения полиномиальных аппроксимаций аналитических моделей в интересующей области режимов, если аналитическая модель сложна и неудобна для практического использования.

Весь комплекс исследований надежности технического устройства представляет собой целую серию исследовательских процедур, предполагающих использование определенных методов.

В зависимости от задачи исследования свойств объекта, наличия априорной информации и т.п. можно выбрать тот или иной метод планирования реализовать соответствующий план решения.

Приведем краткую характеристику основных методов планирования планов, получивших распространение в практических исследованиях.

Методы дисперсионного анализа. С помощью этих методов производится разложение дисперсии результативного признака на составляющие, соответствующие исследуемым факторам, с целью установить существенно каждой составляющей на фоне ошибки эксперимента. В зависимости от числа источников дисперсии различают однофакторный и многофакторный дисперсионный анализ.

Если при постановке опытов реализуются все возможные совокупности условий, задаваемые выбранной схемой эксперимента, говорят о полных классификациях дисперсионного анализа. Если же реализуются не все возможные совокупности условий, а некоторая их часть, т.е. производится сокращение перебора вариантов, речь идет о неполных классификациях дисперсионного анализа.

Сокращение перебора вариантов может производиться случайным образом или в соответствии с некоторыми строгими правилами.

Полные классификации дисперсионного анализа применяются для предварительных исследований в задачах отсеивающего и элиминирующего эксперимента с качественными факторами. Число факторов при этом обычно более пяти, так как полный перебор вариантов требует постановки большого числа опытов. Полные классификации стали традиционными методами исследования и широко используются в практике решения технических задач.

Среди неполных классификаций дисперсионного анализа с ограничениями на рандомизацию наиболее популярными являются комбинаторные схемы. Эти планы используются в задачах элиминирующего эксперимента для исключения влияния неоднородностей, в задачах отсеивающего эксперимента для оптимизации перебора уровней количественных и качественных факторов, а также при построении различного рода сложных планов



для специфических задач (оценка).

Методы математического описания многофакторных объектов. Методы используются для получения математических моделей (обычно в виде полиномов), адекватно описывающих зависимость результативного признака от следуемых факторов в интересующей области факторного пространства. Различают двухуровневые и многоуровневые, симметричные и несимметричные факторные планы: план второго, третьего и высших порядков, применяемые для получения моделей в виде полиномов соответствующей степени.

Методы экстремального эксперимента (крутое восхождение симплекс-метод, случайный поиск и др.). Применяются для отыскания оптимального режима функционирования многофакторного объекта.

Методы отсеивающего эксперимента (сверхнасыщенные двухуровневые, многоуровневые планы случайного баланса, насыщенные планы типа полного и дробного факторного эксперимента, планы последовательного отсеивания). Используются для выявления наиболее существенных факторов, ответственных за процесс.

Методы планирования эксперимента на симплексе (симплекс-решетчатые, симплекс-центроидные и т.п. планы). Предназначены для изучения математического описания свойств многокомпонентных, систем и смесей, когда на независимые переменные наложены ограничений типа:

$$\sum_{i=1}^k x_i$$

где  $x_i$  - содержание  $i$ -го компонента в смеси. Формулировка таких задач возможна, например, в металловедении при изучении свойств сплавов в зависимости от компонентного состава.

Методы для динамических задач планирования (планы ортогональные дрейфу, последовательные процедуры типа эволюционного планирования, симплексный метод адаптационной оптимизации и др.). Предназначены для изучения и оптимизации объектов с изменяющимися (дрейфующими) характеристиками и могут быть использованы, например, при выработке оптимального плана.

Методы изучения механизма явлений. Используются для оценки моделей известной структуры, которые описывают механизм явления.

Возможно также уточнение (не обязательно всех) констант моделей, а также постановка дискриминирующих экспериментов для решения задачи выбора одной из альтернативных моделей. Для оценки констант часто применяют обычные факторные планы, для других случаев - в основном планы последовательного типа.

Представленная классификация методов планирования и планов условна, но тем не менее может быть использована в качестве предварительной чтобы помочь экспериментатору ориентироваться в различных разделах теории планирования эксперимента.

Перечисленные методы планирования эксперимента часто используют вместе на разных этапах комплексного исследования многофакторного объекта. На первых этапах при малом уровне априорной информации ограничиваются получением формальных моделей типа полиномов регрессии; по мере накопления информации на заключительных этапах возможен переход к построению моделей, описывающих механизм явлений, и постановке эксперимента для оценки их параметров или дискриминации моделей.

Отметим также, что в реальных задачах для получения необходимой информации на разных этапах комплексного исследования объекта приходится прибегать к совместному применению методов пассивного и активного эксперимента.

#### **5.4. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий**

Планирование факторного эксперимента  $2^k$  предполагает реализацию всех возможных комбинаций  $k$  исследуемых факторов, каждый из которых рассматривается на двух уровнях. Число опытов в таких планах  $N = 2^k$ , что составляет для двух факторов  $2^2 = 4$ , для трех  $2^3 = 8$ , для четырех  $2^4 = 16$  опытов и т.д.

Рассмотрим структуру простейшего плана типа  $2^2$  для двух факторов. Пусть, например, изучается влияние величины давления в гидросистеме  $x_1$  и свойств загрязняющих примесей  $x_2$ , на подачу насосов  $y$ . В качестве нижнего уровня фактора  $x_1$ , выбрано давление 20 кгс/см<sup>2</sup> в качестве верхнего - 63 кгс/см<sup>2</sup>. Для фактора  $x_2$ , (номинальный размер частиц загрязнителя) выбранные уровни соответствуют 0 и 28 мкм. Перебор всевозможных комбинаций уровней факторов составит полный факторный эксперимент из четырех опытов (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Матрица плана  $2^2$

Опыт	Кодирование переменных		Выход процесса
	$x_1$	$x_2$	
1	-1	-1	$y_1$
2	+1	-1	$y_2$
3	-1	+1	$y_3$
4	+1	+1	$y_4$

Для облегчения последующих расчетов произведем преобразование уровней факторов (так называемое кодирование) к безразмерным кодированным переменным  $x_i$  по формуле:

$$x_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\lambda_i} \quad i(i = 1 - 2)$$

где  $x_i$  - значение факторов в натуральных переменных;  $x_{i0}$  - значение фактора на так называемом основном уровне, представляющем среднее арифметическое между выбранными верхним и нижним уровнем;  $\lambda_i$  - шаг варьирования;  $x_i$  - значения кодированных переменных.

Таким образом, по результатам ПФЭ  $2^3$  можно определить восемь коэффициентов в уравнении регрессии (табл. 5.2):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

Таблица 5.2 – Матрица плана  $2^3$

$U$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	Обознач. строк
1	+	-	-	-	+	+	+	-	(1)
2	+	+	-	-	-	-	+	+	$x_1$
3	+	-	+	-	-	+	-	+	$x_2$
4	+	+	+	-	+	-	-	-	$x_3$
5	+	-	-	+	+	-	-	+	$x_1x_2$
6	+	+	-	+	-	+	-	-	$x_1x_3$
7	+	-	+	+	-	-	+	-	$x_2x_3$
8	+	+	+	+	+	+	+	+	$x_1x_2x_3$

Аналогичным образом составлен план ПФЭ  $2^4$ , в котором таблица опытов представляет ПФЭ  $2^3$  с  $x_4$  на нижнем уровне (-), к которому добавлены еще такие же 8 опытов с  $x_4$  на верхнем уровне

(+) (табл. 5.3). По результатам ПФЭ  $2^4$  можно определить 16 коэффициентов в уравнении регрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4$$

Каждому из входящих в уравнение членов будет соответствовать столбец полной матрицы ПФЭ  $2^k$ .

В последнем столбце табл. 5.2 и табл. 5.3 приведена более компактная форма записи планов, в виде обозначения строк, в которых указаны факторы, находящиеся на верхнем уровне в данном опыте. Строка, где все факторы заходящиеся па нижнем уровне, обозначена через (1). Заметим, что в указанных таблицах обозначения опытов с № 5 по № 8 получаются умножением опытов с №1 по №4 на  $x_3$ , а обозначения опытов с № 1 по № 8 - на  $x_4$ . Иногда в форме записи планов вместо  $x_1, x_2$  и т.д. используют обозначения  $a, в$  и т.д.

Таблица 5.3 – Матрица плана  $2^4$

$U$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	Обознач. строк
1	+	-	-	-	-	(1)
2	+	+	-	-	-	$x_1$
3	+	-	+	-	-	$x_2$
4	+	+	+	-	-	$x_3$
5	+	-	-	+	-	$x_1x_2$
6	+	+	-	+	-	$x_1x_3$
7	+	-	+	+	-	$x_2x_3$
8	+	+	+	+	-	$x_1x_2x_3$
9	+	-	-	-	+	$x_4$
10	+	+	-	-	+	$x_1x_4$
11	+	-	+	-	+	$x_2x_4$
12	+	+	+	-	+	$x_1x_2x_4$
13	+	-	-	+	+	$x_3x_4$
14	+	+	-	+	+	$x_1x_3x_4$
15	+	-	+	+	+	$x_1x_2x_3$
16	+	+	+	+	+	$x_1x_2x_3x_4$

Уравнение для представления результатов ПФЭ  $2^k$  записывается в следующем виде:

$$y = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_{i \leq j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i \leq j \leq l} b_{ijl} x_i x_j x_l + \dots +$$

где  $b = \frac{\sum_{u=1}^N y_u x_u}{N}$ .

Общее число взаимодействий:

$$C_k^m = \frac{k!}{m!(k-m)!},$$

где  $k$  - число факторов,  $m$  - число элементов, входящих в эффект взаимодействия.

Заметим, что матрицы ПФЭ  $2^k$  обладают следующими свойствами:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} = 0 \quad - \quad \text{свойство симметричного расположения уровней}$$

относительно центра эксперимента,

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} = 0; \quad i \neq j, \quad i, j = 0, 1, \dots, k$$

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = 0 \quad - \quad \text{свойство ортогональности, скалярное произведение двух}$$

любых вектор-столбцов равно нулю;

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = 0 \quad - \quad \text{свойство нормировки, сумма квадратов элементов любого}$$

столбца равна числу опытов. Дисперсии коэффициентов регрессии, определяемые с помощью таких планов, минимальны и равны. Свойство ортогональности обеспечивает также независимость определения коэффициентов регрессии. Ошибка, предсказанная уравнением регрессии, одинакова для точек, равноудаленных от центра эксперимента, - свойство работоспособности плана:

$$S^2\{y\} = \frac{S^2\{y\}}{N} (1 + \sum x_i^2).$$

В этом случае информация, за меру которой принимают величину  $1/S^2\{y\}$  равномерно распределена по сфере с радиусом

$$\rho = \sqrt{\sum_{i=1}^k x_i^2}. \quad \text{Если уравнение регрессии используется для продвижения}$$

к оптимуму, свойство рототабельности представляется полезным, так

как заранее не известно, где лежит оптимум.

При записи матрицы плана в стандартном виде для определения коэффициентом регрессии удобно применять формализованную схему, предложенную Йетсом [1]. В соответствии с этой схемой расчеты для плана с  $k$  факторами выполняются за  $(k^{-1})$  этапов. На первом этапе вычисляют суммы последовательных результатов наблюдений:

$$y_u; y_1 + y_2 + y_3 + y_4, \dots, y_N + y_{N+1},$$

а затем разности этих пар:

$$y_2 - y_1, y_4 - y_3, \dots, y_n - y_{n+1}.$$

Для столбца полученных результатов повторяют аналогичную операцию «сложений» и «вычитаний» и получают столбец (2) и т.д. до получения  $k$ -го столбца. Элементы этого последнего полученного столбца делят на общее число опытов плана  $N$  и получают искомые значения коэффициентов соответствующий строке (1) плана, дает значение  $b_0$ , результат второй строки  $x_1$ - дает  $b_i$  и т.д.

Схема расчетов коэффициентов по методу Йетса для плана  $2^3$  можно представить в виде таблицы 5.4.

Таблица 5.4 – Расчет коэффициентов регрессии по схеме Йетса

Опыт	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_u$	1-й этап	2-й этап	3-й этап	Обоз. строк
1	-	-	-	$y_1$	$y_1 + y_2$	$y_1 + y_2 + y_3 + y_4$	$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8$	1
2	+	-	-	$y_2$	$y_3 + y_4$	$y_5 + y_6 + y_7 + y_8$	$y_2 - y_1 + y_4 - y_3 + y_6 - y_5 + y_8 - y_7$	$x_1$
3	-	+	-	$y_3$	$y_5 + y_6$	$y_2 - y_1 + y_4 - y_3$	$y_3 + y_4 - y_1 - y_2 + y_7 + y_8 - y_5 - y_6$	$x_2$
4	+	+	-	$y_4$	$y_7 + y_8$	$y_6 - y_5 + y_8 - y_7$	$y_4 - y_3 - y_2 - y_1 + y_8 - y_7 - y_6 - y_5$	$x_1 x_2$
5	-	-	+	$y_5$	$y_2 - y_1$	$y_3 + y_4 - y_1 - y_2$	$y_5 + y_6 + y_7 + y_8 - y_1 - y_2 - y_3 - y_4$	$x_3$
6	+	-	+	$y_6$	$y_4 - y_3$	$y_7 + y_8 - y_5 - y_6$	$y_6 - y_5 + y_8 - y_7 - y_2 - y_1 + y_4 - y_3$	$x_1 x_3$
7	-	+	+	$y_7$	$y_6 - y_5$	$y_4 - y_3 - y_2 - y_1$	$y_7 + y_8 - y_5 - y_6 - y_3 + y_4 - y_1 - y_2$	$x_2 x_3$
8	+	+	+	$y_8$	$y_8 - y_7$	$y_8 - y_7 - y_6 - y_5$	$y_8 - y_7 - y_6 - y_5 - y_4 - y_3 - y_2 - y_1$	$x_1 x_2 x_3$

В заключении необходимо отметить, что в большинстве случаев при выполнении исследовательских испытаний технических устройств необходимо учитывать наличие парных взаимодействий факторов и взаимодействий факторов более высоких порядков. Поэтому необходимо использование планов полного факторного эксперимента или планов дробного факторного эксперимента

невысокой дробности. Однако в задачах оптимизации достаточно часто приходится применять планы дробного факторного эксперимента, позволяющие оценивать только линейные эффекты факторов. Иногда особенности задачи могут требовать оценки, в основном, некоторых взаимодействий факторов, а большинство линейных эффектов предполагается незначительными.

### **5.5. Методы оптимизации многофакторных экспериментов**

В настоящее время в теории эксперимента разработаны методы оптимизации исследуемых параметров. Основными из получивших широкое распространение в практике являются метод крутого восхождения и симплексный метод оптимизации.

Метод крутого восхождения, называемый также методом Бокса-Уидсона по имени его авторов, предполагает «шаговое» изучение поверхности отклика для определения направления и последующего продвижения к оптимуму, напоминая итерационные методы решения задач вычислительной математики. Стратегия поиска экстремума заключается в последовательной постановке небольших серий опытов при использовании планов ПФЭ или ДФЭ типа  $2^k$  с последующим движением в направлении градиента функции отклика. Такое направление, как известно, соответствует кратчайшему пути к оптимуму. На первом этапе в окрестности некоторого исходного режима реализуют план типа  $2^k$ , по результатам которого строят линейное уравнение регрессии и проводят его статистический анализ (проверяют значимость коэффициентов и адекватность уравнения). Адекватность уравнения дает возможность перейти к движению в направлении градиента функции отклика:

$$\Delta y = b_{1i} + b_{2j} + \dots + b_{k1},$$

где  $i, j, \dots, 1$  – единичные векторы в направлении координатных осей.

Для осуществления указанного движения необходимо менять факторы пропорционально полученным коэффициентам регрессии  $b_i$  с учетом их знака. Поскольку движение в направлении градиента предусматривает выход за пределы области, изученной в факторном эксперименте, метод крутого восхождения представляет собой не что иное, как использование линейного уравнения регрессии для экстраполяционных расчетов отклика  $y$ .

Движение по градиенту реализуют до тех пор, пока наблюдается улучшение значения параметра оптимизации. Если достигнуть оптимума в первой серии опытов крутого восхождения не удастся, в

окрестности лучшего найденного режима ставят новый эксперимент  $2^k$ , определяют новое направление движения по градиенту и т.д. Такая процедура постановки планов  $2^k$  с последующим движением по градиенту проводится до достижения области нахождения оптимального режима – так называемой «стационарной» области. Исследование этой области осуществляют с помощью более сложных планов, позволяющих получить ее описание в виде нелинейных (обычно квадратичных) функций. Математический анализ таких функций позволяет определить координаты экстремума и поведение (характер) поверхности отклика в его окрестности.

Практическая процедура поиска экстремума по методу крутого восхождения осуществляется в следующей последовательности.

1. В окрестности исходного режима, отвечающего лучшим известным условиям, проводится ПФЭ илиДФЭ типа  $2^k$ . Выбор исходной точки шагов варьирования по факторам и представление данных в виде матрицы планирования для кодированных значений факторов проводятся обычным образом. Единственное отличие состоит в том, что шаги варьирования выбирают не слишком большими, чтобы исследуемый участок поверхности отклика не сильно отличался от линейного и его можно было бы адекватно описать полиномом первого порядка. Далее полученные результаты эксперимента  $2^k$  подвергаются обычной процедуре статистического анализа, который включает:

а) проверку воспроизводимости эксперимента и вычисления ошибки опыта  $S_y$ ;

б) проверку значимости коэффициентов регрессии  $b_i$  линейной модели;

в) проверку адекватности полученной линейной модели вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k.$$

2. Вычисляют произведение коэффициентов на шаги варьирования  $b_i\Delta x_i$  с максимальным значением произведения ( $b_j\Delta x_j$ ) принимается за базовый, т.е.

$$b_\delta\Delta x_\delta = \max(b_i\Delta x_i).$$

3. Для базового фактора выбирают шаг для движения по крутому восхождению  $\lambda_\delta$ . Обычно оставляют старый шаг  $\lambda_\delta = \Delta x_\delta$  или более мелкий для осторожного движения в направлении оптимума.

4. Определяют величины шагов для других факторов  $\lambda_i$ .



Поскольку для движения по градиенту факторы должны изменяться соответствующим коэффициентам наклона  $b_i$ , значения  $\lambda_i$ , находят умножением коэффициентов  $b_i$  на отношение произведений:

$$I_i = \frac{b_i \Delta x_i}{b_\delta \Delta x_\delta}, \text{ т.е. } \lambda_i \cdot \lambda_\delta.$$

Полученные шаги обычно округляют.

5. Рассчитывают условия опытов по крутому восхождению путем одновременного прибавления или вычитания (в зависимости от знака коэффициента  $b_i$ ) шагов  $\lambda_i$  к исходному уровню фактора  $x_{i0}$ . «Предсказанные» значения отклика в указанной серии «мысленных» опытов определяют по формуле:

$$\tilde{y} = b_0 + h \sum_{i=1}^k b_i \lambda_i,$$

где  $h = 1, 2, 3, \dots$  – номер шага, – или более просто:

$$y_h = y_{h-1} + (y_1 - b_0) = h\tilde{y}_{h-1} - (\tilde{y} - b_0).$$

Необходимо отметить, что в крутом восхождении строго формализованные этапы (реализация матрицы плана, расчет коэффициентов регрессии, движение по градиенту и т.д.) сочетаются с принятием интуитивных творческих решений. Эффективность оптимизации в значительной степени зависит от удачного выбора этих решений.

Перед оптимизацией производят выбор основного уровня, в качестве которого принимают значения факторов, соответствующих лучшему известному режиму, либо используют информацию о лучших режимах для аналогичных процессов. Чем удачнее выбран основной уровень, тем меньше потребуется опытов для достижения оптимума.

При выборе шагов для крутого восхождения  $\lambda$ , необходимо учитывать, что небольшие шаги приведут к неоправданно большим затратам – путь к оптимуму окажется долгим. В случае больших шагов существует риск проскочить через оптимум.

Успех крутого восхождения зависит также от выбора интервалов варьирования  $\Delta x_i$ , в исходном факторном эксперименте  $2^K$ . Верхняя граница величины интервала определяется требованиями получения адекватности линейного приближения, нижняя – требованием отдельного определения нижнего и верхнего уровней фактора, которые обеспечивают различие значений отклика,

заметные на фоне шума, создаваемого неуправляемыми факторами. В зависимости от величины  $\Delta x_i$  происходят растяжение и сжатие поверхностей отклика вдоль соответствующих осей координат. При неправильном выборе интервалов варьирования может, например, оказаться, что значимым является только один коэффициент. Крутое восхождение в этом случае вырождается в однофакторное и может оказаться малоэффективным. Поскольку изменение интервалов  $\Delta x_i$  в  $P$  раз приводит к изменению коэффициента  $b_i$  и соответствующего шага для крутого восхождения  $\lambda_i$  в  $\beta^2$  раз, необходимо всегда стремиться к выбору шага, при котором значения коэффициентов  $b_i$  будут одного порядка по величине. В этом случае можно рассчитывать на максимальную точность в определении направления градиента.

Один из приемов, рекомендуемых при крутом восхождении, состоит в коррекции интервалов  $\Delta x_i$  после первой серии опытов по плану  $2^K$ . Увеличивая  $\Delta x_i$  для малых  $b_i$  и уменьшая для больших, реализуют новый эксперимент  $2^K$  и только после этого осуществляют крутое восхождение.

Весьма важным моментом при оптимизации является принятие решения после реализации плана  $2^K$ .

Как указывалось, крутое восхождение должно проводиться в условиях адекватности линейного приближения, полученного по результатам плана  $2^K$ . В случае значимости всех коэффициентов линейной модели переходят к крутому восхождению или проводят корректировку интервалов  $\Delta x_i$  для получения коэффициентов  $b_i$  одного порядка по величине.

Наиболее распространенным является вариант, когда часть коэффициентов линейной модели незначима. Для выявления ситуации, как и в общем случае применения планов  $2^K$ , принимают следующие решения: 1) поставить новый эксперимент, увеличив интервалы варьирования по незначимым факторам, при этом центр эксперимента обычно переносится в условия опыта предыдущей серии; 2) увеличить число повторностей опытов, если имеются основания считать, что незначимость коэффициентов является следствием большой ошибки эксперимента; 3) поставить дополнительные опыты, построив, например, дробную реплику до полного факторного эксперимента с целью выделить интересующие

линейные эффекты в «чистом виде», отдельно от взаимодействий, с которыми они были смешаны.

Если затраты на постановку указанных дополнительных опытов до проведения крутого восхождения велики, можно принять решение о движении только по значимым факторам. В случае успеха такого движения вышеуказанные приемы могут быть проделаны в новом, лучшем режиме.

Процесс принятия решений после реализации плана  $2^k$  усложняется, если линейная модель оказалась неадекватной. Заключение о неадекватности модели можно сделать до статистического анализа с расчетом  $F$ -критерия, если бы один из коэффициентов взаимодействий факторов  $b_{ij}$  оказался значим или же разность:  $\sum \beta_{ij} = y_0 - b_0$  существенно превышает ошибку эксперимента. Последнее указывает на необходимость учета квадратичных эффектов, т.е. перехода второго порядка.

Можно добиться адекватности линейной модели, уменьшив интервалы варьирования  $\Delta x_i$ . При этом центр эксперимента переносится в условия лучшего опыта предыдущей серии. Другое решение – осуществить движение по градиенту при неадекватной модели, т.к. оно может оказаться эффективным и привести к получению лучших результатов, чем достигнутые. Такое решение следует принимать после проведения дополнительных опытов в центре плана, убедившись, что величина  $\sum \beta_{ij} = y_0 - b_0$  сравнима с ошибкой эксперимента (кривизна поверхности отклика мала). В противном случае шансы улучшения результатов при движении по градиенту невелики.

В отличие от случая линейной модели, где в качестве исходного уровня для крутого восхождения можно брать лучшую точку плана  $2^k$ , здесь расчет опытов крутого восхождения ведут от основного уровня (центральной точки плана  $2^k$ ), чтобы не пропустить экстремум, если он лежит внутри, области, охватываемой точками плана  $2^k$ . Неэффективное крутое восхождение на основе неадекватной модели требует принятия мер для выяснения причин и устранения неадекватности: постановки опытов в центре плана для оценки квадратичных эффектов  $\sum \beta_{ij}$ , изменения интервалов варьирования, переноса центра эксперимента и т.д. Общей причиной неэффективности крутого восхождения в случае как линейной, так и

нелинейной моделей может быть наличие дрейфа результатов из-за действия неуправляемых факторов или нарушение предпосылки об одноэкстремальной поверхности отклика. Гипотеза о временном дрейфе проверяется периодическим повторением одного из опытов первой серии. Принятие гипотезы требует применения специальных планов для элиминирования дрейфа при оценке коэффициентов  $b_i$ , используемых в крутом восхождении. Для проверки гипотезы многоэкстремальности можно провести несколько экспериментов  $2^K$  в разных начальных точках с последующим крутым восхождением.

В обычных случаях, если область исследования близка к оптимальной, после крутого восхождения принимают решение об окончании исследования или о постановке плана второго порядка для детального описания области оптимума квадратичной модели. В простейших случаях ограничиваются дополнительной оценкой взаимодействия факторов путем достройки ДФЭ  $2^K$  до ПФЭ или ДФЭ меньшей дробности с целью получения адекватности описания исследуемой области.

Симплексный метод оптимизации, симплексный метод планирования - один из новых методов оптимизации многофакторных объектов. В отличие от рассмотренного выше метода крутого восхождения, при котором вначале реализуют планы типа 2 (пробные шаги) и только затем по получаемой линейной модели вычисляют направление градиента и совершают движение к оптимуму (рабочие шаги), в этом методе пробные и рабочие шаги совмещены. Это достигается тем, что эксперименты ставятся по так называемому симплекс-плану в точках многофакторного пространства, обладающая минимальным количеством вершин. Очевидно, количество вершин симплекса на единицу больше размерности пространства. В случае двух переменных, т.е. на плоскости, симплекс представляет собой треугольник, для трех переменных – треугольную пирамиду (тетраэдр) и т.д. Симплекс называется регулярным, если все расстояния между его вершинами равны. Из любого симплекса можно, отбросив одну из вершин и используя оставшуюся грань, построить новый симплекс, добавив всего лишь одну точку, расположенную зеркально отброшенной. Это свойство и лежит в основе использования симплекса для целей оптимизации.

При реализации опытов согласно симплекс-плану полученные в них результаты сравниваются, далее отбрасывается вершина симплекса с худшим результатом и ставится новый опыт в точке,

являющейся зеркальным отображением отброшенной. Для нового симплекса опять сравнивают полученные результаты, отбрасывают худшую вершину и ставят новый опыт. Так, путем последовательного отбрасывания вершин осуществляется перемещение симплекса с каждым опытом в направлении к оптимуму. Центр симплекса будет при этом описывать траекторию, близкую к траектории по градиенту в методе крутого восхождения. Процедура оптимизации по симплекс-методу описана в известной литературе. Основные достоинства симплексного метода оптимизации:

- 1) метод полностью формализован и дает четкое правило, когда и как надо изменять условия процесса;
- 2) использование метода не требует проведения статистического анализа результатов, как при крутом восхождении, и не предъявляет строгих требований к адекватности линейного приближения исследуемой области поверхности отклика;
- 3) в процессе оптимизации вычисления крайне просты и сводятся на каждом шаге к определению координат одной новой точки;
- 4) для принятия решений о постановке нового опыта не требуется точно измерять значения выходного показателя, достаточно их проранжировать, чтобы различать худшие значения. Это достоинство можно использовать в задачах, где выход оценивается качественно, а также в случае большого числа откликов или наличия ограничений назначения факторов  $x'_i \leq x_i \leq x''_i$  и откликов  $y'_i \leq y_i \leq y''_i$ . Решение о постановке нового опыта для оптимизации по всем откликам и соблюдение ограничений проводилось путем отбрасывания той из худших точек вершин симплекса, зеркальное отображение которой дает новую точку, удовлетворяющую указанным требованиям и не нарушающую ограничений;
- 5) на любом этапе оптимизации легко добавить еще один фактор путем дополнительного введения в симплекс всего одной точки, которая вместе с другими точками образует симплекс размерностью на единицу больше;
- 6) в процессе оптимизации движение к оптимуму осуществляется после каждого опыта, а не после серии опытов, что имеет большое психологическое значение, т.к. здесь экспериментатору реже приходится ставить опыты, которые по запланированной программе ожидаются плохими;
- 7) метод хорошо приспособлен для оптимизации дрейфующих объектом (например, объектов биотехнологии). В этом случае

симплекс будет отслеживать дрейфующий оптимум; 8) постановка опытов по симплекс-плану не предъявляет строгих требований к регулярности симплекса, т.е. строгому поддержанию факторов на заданных уровнях.

Недостатки симплексного метода оптимизации:

- 1) метод дает ограниченную информацию о поверхности отклика и не оценивает взаимодействий факторов;
- 2) все факторы должны быть количественными;
- 3) эффективность метода сильно падает с ростом ошибки эксперимента. При этом совершается больше ошибочных движений на пути к оптимуму с заикливанием в отдельных точках. Для устранения последнего недостатка используют модификации симплексного метода.

### **5.6. Рабочее место экспериментатора и его организация**

Как видно из предыдущих разделов, матрица факторного эксперимент представляет собой определенную комбинацию режимов и условий использования конкретных устройств. Для окончательного построения плана экспериментальных работ необходимо определить еще ряд условий: длительность испытаний, порядок проведения замеров значений основных параметров, предельное состояние для устройства, понятие отказа и т.п.

Так, для построения математической модели, где в качестве критерия оптимизации выбран какой-либо из показателей надежности, необходимо реализовать план эксперимента, проведя испытания устройств на долговечность. В зависимости от того, какой из показателей надежности выбран в качестве зависимой переменной, (критерия оптимизации), будет определена стратегия указанных испытаний.

Из практики исследований надежности технических устройств известны основные виды испытаний: испытания, основанные на времени безотказной работы, а также испытания на надежность с использованием информации о наработках до отказов. Известны характеристики шести основных планов питания на надежность:  $[N, G, T]$ ;  $[N, B, T]$ ;  $[N, B, r]$ ;  $[N, B, r]$ ;  $[N, B, (r, T)]$ ;  $[N, B, (r, T)]$ , где  $N$  - число испытываемых элементов;  $B$  - обозначает, что отказывающиеся элементы не заменяются новыми;  $B$  - обозначает, что каждый отказавший элемент заменяется новым, идентичным;  $r$  - планы, в которых испытания ведутся до появления  $r$ -го отказа;  $T$  - планы, в

которых испытания ведутся в течение времени  $T$ ;  $(r, T)$  - смешанные планы, в которых испытания ведутся до момента  $t_r$  (появления  $r$ -го отказа), если  $t_r < T$ , или до момента  $T$ , если  $t_r > T$ .

В таблице 5.5. приведены виды испытаний, которые необходимо проводить для оценки основных показателей надежности. Следует учитывать, что показатели надежности определяются на основании обработки статистических данных значительного числа параллельных опытов. Это требует значительного объема экспериментальных работ. Поэтому при планировании таких экспериментов необходимо тщательно анализировать все имеющиеся возможности сокращения как длительности экспериментов, так и числа испытываемых объектов.

В случае, если известен аналитический вид распределения времени безотказной работы, то объем факторного эксперимента можно значительно сократить. Целесообразно пополнять недостающую информацию за счет проведения кратковременных факторных экспериментов, преследующих цель изучения влияния различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на работоспособность конкретных устройств. В этом случае зависимыми переменными могут быть выбраны различные качественные характеристики технических устройств, например, производительность, прочность, жесткость, герметичность и т.п.

Таблица 5.5 – Виды испытаний для оценки показателей надежности

№	Показатели надежности	Виды испытаний
1	Ресурс.	До достижения устройствами предельного состояния.
2	Гамма-процентный ресурс.	До достижения предельного состояния всех или части устройств.
3	Наработка на отказ (среднее время безотказной работы)	До достижения устройствами предельного состояния при обязательном учете всех отказов
4	Средняя наработка до первого отказа	До отказа устройств
5	Коэффициент готовности	До момента проведения планового обслуживания или в течение заданной наработки $T$ при обязательном учете времени наработки между отказами и времени восстановления устройств

6	Коэффициент технического использования	В течение определенной наработки $T^1$ при обязательном учете времени работы и времени всех простоев, вызванных техническим обслуживанием и ремонтами
7	Вероятность безотказной работы	В течение заданного времени
8	Интенсивность отказов	До отказа устройств
9	Параметр потока отказов.	В течение определенного времени при учете всех отказов.

### 5.7. Организация проведения эксперимента

Приступая к исследованиям, экспериментатор должен обратить серьезное внимание на подготовку и организацию проведения экспериментальных работ. Жесткие требования к точности контроля исследуемых параметров, к выбору объектов испытаний, подготовке испытательного оборудования обусловлены теорией планирования эксперимента. Только тогда можно с успехом использовать методологию и аппарат математического планирования экспериментов, когда исследователь гарантирует высокую точность контроля всех исследуемых факторов, представительность выборки исследуемых объектов, исключение систематических погрешностей при испытаниях.

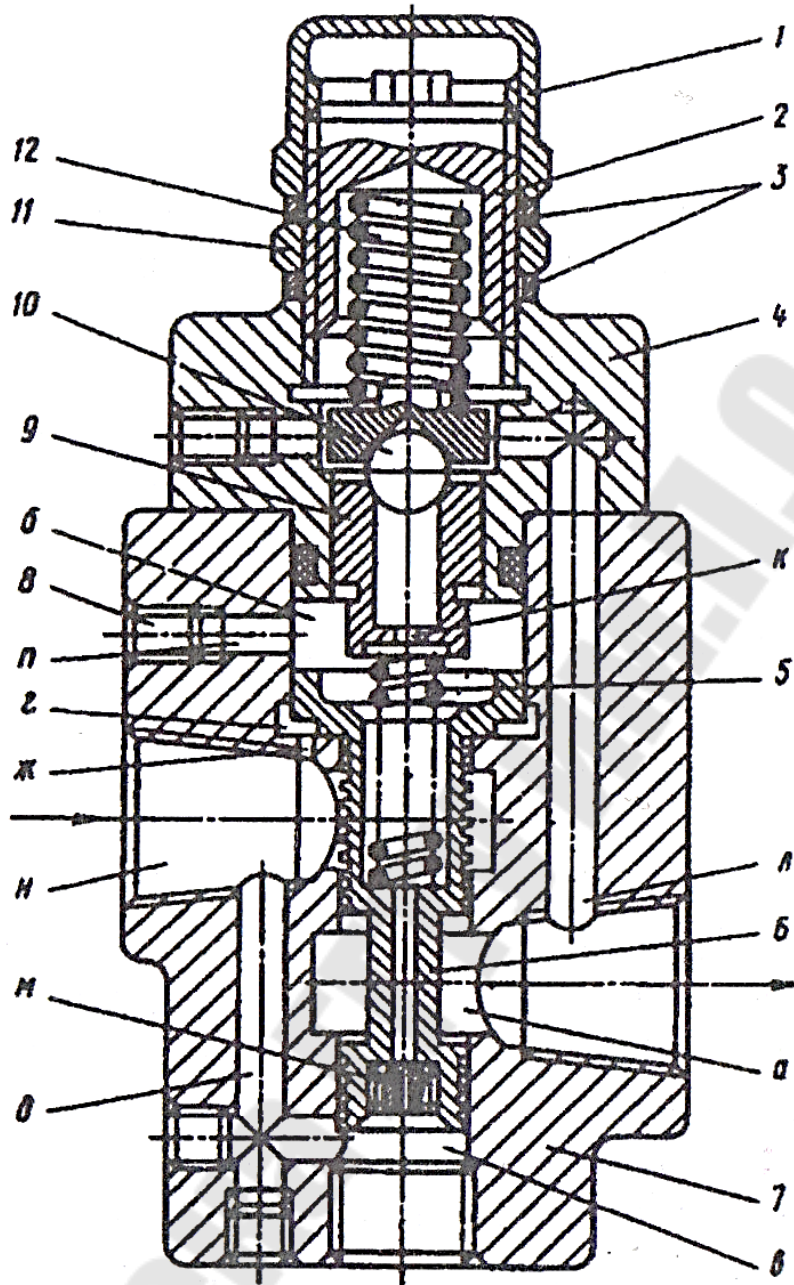
Оборудование, которое используется при проведении активного эксперимента, должно позволять не только точно контролировать параметры исследуемых устройств, но и обеспечивать управление ими в выбранных пределах.

Проверку и тарировку измерительных приборов и аппаратуры необходимо производить перед каждым экспериментом.

Журнал испытаний должен быть также заранее подготовлен в соответствии с методикой и планом опытов. Здесь должны быть приведены результаты предварительных расчетов, перечислены исследуемые факторы с указанием единиц измерения, а также помещена таблица уровней факторов и пределов их изменения. Журнал должен содержать также данные обмеров деталей предварительных испытаний устройств, анализы масел и т.п. Матрица планирования должна предполагать возможность записи результатов повторных опытов, примечаний.

В качестве примера рассмотрим образец оформления журнала испытаний при исследовании работоспособности предохранительных клапанов (рис. 5.1) гидравлических систем.





1 - колпачок; 2 - регулировочный винт; 3 - прокладки; 4 - крышка; 5 - пружина; 6 - золотник; 7 - корпус; 8 - пробка; 9 - седло клапана; 10 - шарик; 11 - гайка; 12 - пружина; а - полость слива масла; б, в, г - камеры; д, ж, к, л - каналы; м - демпфирующее отверстие; н - полость подвода масла под давлением; п — отверстие

Рисунок 5.1 – Предохранительный клапан Г52-1 с переливным золотником

Планирование эксперимента с целью исследования влияния эксплуатационных факторов на работоспособность предохранительных клапанов гидравлических систем

Цель исследования: Определение степени влияния эксплуатационных факторов на изменение технических характеристик предохранительных клапанов в процессе их испытаний.

Объект исследования.

Клапан предохранительный с переливным золотником типа Г52-1 (рис. 5.1). Назначение: предохранение гидросистемы от перегрузки давлением и разгрузки от давления с помощью дистанционного управления. Клапан состоит из корпуса 7, переливного золотника 6, пружин 5 и 12, шарикового клапана и крышки 4. Масло от насоса подводится к клапану через полость *a*.

Переливной золотник 6 находится под воздействием пружины 5. В отверстие золотника ввернут демпфер, через отверстие *m* которого камера *б* постоянно сообщается с камерой *в*. Камера *в* сообщается с полостью *n* и камерой *г* - через каналы *д* и *ж*.

По каналу *к* масло из камеры *б* подводится под шарик 10. Пружина 12 прижимает шарик 10 к седлу 9, а усилие пружины регулируется винтом 2. При нижнем положении золотника 6 полости *a* и *n* разъединены и проход масла из системы в бак закрыт.

Как только давление масла преодолет усилие пружины 12, шарик 10 отойдет от седла 9 и масло начнет уходить из камеры *б* через каналы *к* и *л* на слив. Из камеры *в* через демпфирующее отверстие *m* масло будет протекать в камеру *б*. Поскольку отверстие *m* является гидравлическим сопротивлением, то в камере *б* давление масла будет меньше, чем в камерах *в* и *г*. Вследствие этого золотник 6 поднимется вверх и полости *a* и *n* станут сообщающимися, а маслу откроется путь в бак. Когда давление в камерах *г* и *в* уравнивает давление в камере *б* и усилие пружины 5, давление в системе будет поддерживаться постоянным. Если давление масла на золотник со стороны полости *n* станет меньше усилия пружины 12, шарик 10 прижмется к седлу 9, а слив масла из камеры *б* прекратится. Давление в камерах *г*, *б* и *в* выровняется, и золотник 6 под действием пружины 5 займет нижнее положение. Давление в гидросистеме регулируется винтом 2.

Критерии работоспособности

$y_1$  – изменение утечек в золотниковой паре за период наработки  $2 \cdot 10^4$  циклов в режиме разгрузочного клапана (в  $\text{см}^3/\text{мин}$ );

$y_2$  - абсолютный износ золотника за период наработки  $2 \cdot 10^4$  циклов в режиме разгрузочного клапана (в мкм).

Результаты предыдущих испытаний

Анализ результатов предварительных испытаний и опыта эксплуатации предохранительных клапанов подтверждает нормальное распределение значений выбранных критериев при различных наработках. Изменение критериев в процессе эксплуатации зависит прежде всего от длительности работы, давления в системе, температуры рабочей жидкости и наличия в ней загрязнений.

Исследуемые факторы:

$X_1$  - давление в системе (МПа);

$X_2$  - температура рабочей жидкости ( $^{\circ}\text{C}$ );

$X_3$  - наличие в жидкости искусственного загрязнителя (мкм).

Описание испытательного стенда.

Испытания клапанов производим на специальном стенде.

Техническая характеристика стенда:

- |   |       |
|---|-------|
| 1. Давление в нагнетательной магистрали, $\text{кгс}/\text{см}^2$ | - 65  |
| 2. Мощность привода, кВт  | - 3   |
| 3. Число оборотов привода, об/мин                                 | -1000 |
| 4. Рабочая жидкость - масло «Индустриальное 20» (ГОСТ 1707-51).   |       |

Стенд оборудован устройствами для очистки, перемешивания и регулирования температуры рабочей жидкости. Давление в системе регулируется с помощью специального дросселя, а измеряется манометром типа МКО-100 (класс 0,5). Число оборотов вала насоса измеряется с помощью фотоэлектрического устройства и прибора типа ПС-100. Температура масла измеряется на входе в насос с помощью термометра ТЛ-20 (цена деления шкалы —  $0,1^{\circ}\text{C}$ ). В системе измерений используется секундомер типа ПВ-53 Л.

Для дистанционного управления разгрузкой системы используется золотник с управлением от электромагнита. Цикличность работы клапана обеспечивается специальным программным устройством типа ВС 10-32. Для измерения утечек в клапане используется мерная посуда.

### Загрязнение рабочей жидкости

Жидкость предварительно очищают с помощью фильтровальной станции (степень очистки 8-12 мкм). Для загрязнения жидкости вводится микропорошок М14 (ГОСТ 3647-59). Концентрация загрязнителя - 5-10 % от веса жидкости в системе.

### Уровни факторов и пределы их изменения.

С учетом технической характеристики исследуемого типа клапанов и опыта их эксплуатации устанавливаем пределы изменений независимых переменных (табл. 5.6).

Здесь верхний уровень загрязненности рабочей жидкости выражается в наличии искусственного загрязнителя - микропорошка М14 при весовой концентрации  $5 \cdot 10^{-4}$  %. Соответственно нижний уровень данного фактора предполагает использование очищенной рабочей жидкости (степень очистки 8-12 мкм).

### Проведение эксперимента

В настоящем исследовании значения зависимых переменных определяются по результатам параллельных опытов. Всего подвергается испытаниям 16 предохранительных клапанов. Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 5.7.

Клапанам, используемым для повторных опытов, были присвоены номера с 9 по 16. При этом клапан № 9 был испытан как дублер №1, №10 - №2 и т.д. Для исключения влияния математических ошибок, вызванных внешними условиями и так называемыми организационными факторами, была выбрана случайная последовательность поведения экспериментов (рандомизация во времени). С использованием таблицы случайных чисел была получена последовательность проведения экспериментов: 2, 15, 9, 12, 14, 8, 13, 16, 1, 3, 7, 4, 6, 11, 10.

Замер утечек в золотниковой паре предохранительных клапанов во всех опытах производился при одном режиме: давление в системе - 20 кгс/см<sup>2</sup>; настройка предохранительного клапана - 25 кгс/см<sup>2</sup>; температура рабочей жидкости – 50 °С.

Замеры, которые проводятся в процессе испытаний, заносятся в отдельные таблицы для каждого объекта (табл. 5.8).

Таблица 5.6 – Значения независимых переменных

Параметры	Давление в системе, кгс/см <sup>2</sup>	Температура рабочей жидкости, °С	Искусственный загрязнитель (M14), мкм
Основной уровень	40	50	M14-0,0005
Интервал изменения	20	10	
Верхний уровень	60	60	
Нижний уровень	20	40	

Таблица 5.7 – План и результаты экспериментов

№ п/п	Случайный порядок реализации опытов	Дата проведения опытов	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>		Изменение утечек в золотниковой паре, см <sup>3</sup> /мин		Износ золотника, мкм (на сторону)		Примечание
			код	МПа	код	°С	код	мкм	Повт. опыты	Ср. знач.	Повт. Зам.	Ср. знач.	
1	2 15	20.1-30.1 20.6-30.6	-	2	-	40	-	0	0.0 0.0	0	0.57 0,43	0.5	
2	9 5	10.4-20.4 1.3-10.3	+	6	-	40	-	0	7.5	7	2.45	2.8	
3	12 14	20.5-30.5 10.6-20.6	-	2	+	60	-	0	3.1 4.9	4	2.25 1.35	1.8	
4	8 13	1.4-10.4 1.4-10.4	+	6	+	60	-	0	8.8 7.2	8	2.6 3.4	3.0	
5	16 1	1.7-10.7 10.1-20.1	-	2	-	40	+	14	0 0.01	0	1.07 0.93	1.0	
6	3 7	1.2-10.2 20.3-30.3	+	6	-	40	+	14	11.5 10.5	11	4.45 3.55	4.0	
7	4 6	10.2-20.2 10.3-20.3	-	2	+	60	+	14	5.5 6.5	6	3.85 2.75	3.3	
8	11 12	10.5-20.5 20.4-30.4	+	6	+	60	+	14	15.5 14.5	15	6.3 7.7	7.0	

Таблица 5.8 – Результаты испытаний клапана № 3  
режим испытаний:  $P=3$  МПа;  $t=40$  °С; загрязнитель: микропорошок № М14 (весовая концентрация 0,0005 %)

№ п/п	Дата проведения замеров	Показания счетчика циклов	Утечки в золотниковой паре см <sup>3</sup> /мин	Утечки во вспомогательном клапане см <sup>3</sup> /мин	Примеч.	Подпись лица произв. замер
1	1.2	0000	14	7		
2	1.2	1000	16	7		
3	3.2	5000	17	7		
4	3.2	9000	17	10		
5	7.2	11000	18	11		
6	7.2	15000	25	11		
7	10.2	20000	26	12		
8	10.2	22000	25	12		

Страница 6

#### Данные анализов

В процессе испытаний производим анализ физико-химических свойств на загрязненности рабочей жидкости. Методика лабораторного анализа рабочей жидкостей должна соответствовать ГОСТ 6370-52. При этом определяются: вязкость (по ГОСТ 33 - 66), смолистые вещества (по ГОСТ 2550- 44), кислотное число (по ГОСТ 5985 - 59) и загрязненность (по ГОСТ 6370 - 59).

Периодичность проведения анализов - при постановке каждого нового объекта на испытания.

## **ТЕМА 6. МЕТОДЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **6.1. Общие требования к испытательному оборудованию**

Стендовое оборудование для испытаний отдельных устройств должно обеспечивать получение результатов, позволяющих производить достоверную оценку их основных рабочих параметров, работоспособность, надежность и долговечность. Основными требованиями, предъявляемыми к испытательному оборудованию, являются возможность точного контроля и регулирования исследуемых параметров испытываемых устройств, воспроизводимость результатов при испытаниях нескольких

однотипных изделий, надежность в течение требуемого времени испытаний и др.

Испытания машин и механизмов в зависимости от целей и условий проведения бывают двух типов: лабораторные и эксплуатационные. Основные преимущества и недостатки тех и других широко известны и достаточно полно освещены в литературе. Испытания следует проводить на стендах, которые аттестованы, имеют технический паспорт и описание по ГОСТ 2.601.

Практика исследований и разработок устройств подтверждает, что на стадии разработки машин и механизмов наиболее целесообразно строить программу испытаний так, чтобы испытаниям полноразмерных приводов предшествовали испытания отдельных узлов и элементов с учетом спектра эксплуатационных нагрузок. При этом значительно сокращаются сроки отработки конструкции для обеспечения требуемой надежности.

В предыдущих разделах уже описаны особенности стендовых испытаний устройств в зависимости от задач и конкретных условий. Отдельно остановимся на особенностях ускоренных испытаний. Испытательные стенды и условия проведения испытаний должны удовлетворять требованиям безопасности, оговоренным нормативными документами.

## **6.2. Ускоренные испытания устройств на долговечность**

Современные машины, контрольно-регулирующая аппаратура и другие устройства способны работать в условиях эксплуатации в течение нескольких тысяч часов. Кроме того, значительное рассеяние данных эксплуатационных исследований снижает достоверность полученных результатов. Все это сильно усложняет получение необходимой информации, задерживает на годы доводку новых типов устройств, их модернизацию, а также проверку и внедрение в производство предложений по повышению износостойкости деталей и узлов агрегатов.

Для проведения ускоренных испытаний на долговечность устройств в зависимости от конкретных условий их изготовления и эксплуатации приемлемы следующие три метода:

- 1) использование известных зависимостей, характеризующих работоспособность изделия;
- 2) форсирование режима;
- 3) моделирование.

Первый метод предусматривает проведение испытаний на долговечность партии изделий и получение зависимостей изменения основных оценочных параметров от времени испытаний. Затем предполагается использовать полученные зависимости для определения количественных показателей надежности и долговечности данного типа устройств без проведения длительных испытаний. Этот метод применим для ускоренного определения показателей надежности и долговечности устройств с учетом того, что налажено их массовое производство, а при изготовлении сохраняется стабильность технологического процесса и достигнута высокая культура производства.

Для экспериментального определения необходимых зависимостей, характеризующих работоспособность машин, применялся следующий методологический подход.

Между скоростью изменения подачи насоса и величиной накопления износа основных его деталей существует сложная корреляционная зависимость, которая нам часто неизвестна. В первом приближении зависимость можно выразить с помощью функции вида:

$$\frac{dq}{dt} = c + Kq,$$

где  $q$  - подача насоса;  $t$  - время работы насоса;  $c$  и  $K$  - константы.

Путем несложных преобразований получаем уравнение:

$$q = (q_1 + h) \times 10^{(t-t_1)/A} - h,$$

где  $t_1$  - некоторое фиксированное время;  $q_1$  - среднее изменение за время  $t_1$ .

Работу насосов исследуем на протяжении двух этапов:  $t_1$ , и  $t_2 - t_1$ . Константы  $A$  и  $h$  при этом определяются из выражений:

$$A = \frac{t_2 - t_1}{\lg \frac{S_2}{S_1}};$$

$$h = \frac{q_2 - q_1 \frac{S_2}{S_1}}{\frac{S_2}{S_1} - 1},$$

где  $S_1$  - среднее квадратическое отклонение первого распределения;  $S_2$  - среднее квадратическое отклонение второго распределения.



С использованием полученных зависимостей была произведена математическая обработка результатов испытаний аксиально-поршневых гидромашин Г15-2. Результаты испытаний приведены в корреляционной табл. 6.1. Вычисленные средние арифметические значения изменения производительности гидромашин после наработки 400 и 1500 ч, а также средние квадратические отклонения и значения констант  $A$  и  $h$  следующие:

$$q_1 = 0,97; q_2 = 1,70; S_1 = 0,55; A = 10,261; h = -0,40.$$

Таблица 6.1 – Результаты испытаний партии гидромашин

Время работы, час	$q \text{ см}_3 / \text{об}$											
	400	0,89	1,13	0,15	0,80	1,86	1,34	1,86	0,89	0,50	0,58	0,33
1500	1,30	1,66	0,42	2,39	3,66	4,30	2,08	1,08	0,74	0,38	0,70	1,71

Подставляя значения констант в уравнение связи изменения подачи с износом, получим корреляционное уравнение для подачи гидромашин Г15-2, работающих в заданных условиях:

$$q = 0,57 \times 10^{(t-400)/10261} + 0,40.$$

Настоящий метод можно также применять для прогнозирования работы гидромашин в эксплуатационных условиях. Так, с использованием результатов эксплуатационных испытаний пластинчатых насосов и описанной выше методики было получено корреляционное уравнение для подачи насосов типа Г12, используемых в системах металлообрабатывающего оборудования:

$$q = 5,56 \times 10^{(t-270)/4335} - 1,89.$$

Это уравнение справедливо при наработке насосом от 270 до 765 часов. Экстраполирование значений изменения подачи допустимо лишь при следующих условиях: первый этап должен значительно превышать период приработки; наработка гидромашин между замерами должна быть достаточно большой; должен быть известен (хотя бы ориентировочно) предел, до которого не изменяется закономерность, выражаемая кривой подачи.

В основе второго метода лежит проведение ускоренных испытаний устройств путем форсирования одной из нагрузок (параметров) или комбинаций нескольких форсированных параметров. Приведем общее описание методики определения

значений форсируемых параметров для гидравлических устройств, которые вышли из строя из-за износа основных деталей.

На первом этапе работы устанавливается вид износа, особенности и закономерности изнашивания основных деталей устройств в условиях эксплуатации и обычных стендовых испытаний.

Исследования по этому этапу включают:

- 1) изучение поверхности контакта исследуемых деталей после их изготовления или ремонта;
- 2) получение данных об условиях работы деталей (скорость скольжения, удельные давления, температуры, вибрации, среда и т.п.);
- 3) определение основных характеристик развития процессов изнашивания деталей устройств (интенсивность износа, графики, эпюры и диаграммы, характеризующие особенности изнашивания; профилограммы и рентгенограммы поверхностного слоя деталей, структура поверхностей трения, остаточные напряжения и т.п.);
- 4) установление вида износа.

Следующим этапом является определение предельных значений загрязненности рабочей жидкости абразивом, величины давления в системе, скорости подвижных деталей, температуры рабочей жидкости, вибраций и др. Под предельным значением перечисленных параметров подразумевается такое их значение, при котором физическая картина процесса изнашивания деталей еще аналогична полученной при обычных эксплуатационных испытаниях; вид износа деталей при форсированных и обычных испытаниях должен быть одним и тем же.

Величины предельных значений параметров определяются путем проведения предварительных испытаний узлов. При этом значение определенного параметра постепенно увеличивается от номинального до тех пор, пока не изменяется характер износа элементов устройства. О характере износа деталей можно судить по результатам их периодических обследований, которые проводят в соответствии с программами работ по пунктам 3) и 4) первого этапа. При этом необходимо производить разборку агрегата. Частые разборки при проведении данных исследований нежелательны, поскольку после каждой сборки детали в определенной степени снова проходят процесс приработки. Чтобы избежать этого, необходимо увеличить интервал между разборками (доведя их до двух-трех за период испытаний), а в промежутках между ними проводить постоянный, очень тщательный контроль за температурой отдельных узлов, деталей и рабочей жидкостью, степенью загрязненности и

изменением физических параметров рабочей жидкости, уровнем вибрации узлов, а также уровнем шума и акустическим спектром.

Контроль указанных параметров позволит в некоторой степени определить момент появления признаков качественного изменения характера износа деталей, не производя разборки агрегата.

Основываясь на опыте эксплуатации и специальных испытаний гидравлических устройств, в качестве основного параметра, с помощью которого следует проводить форсирование их режима работы, можно рекомендовать степень загрязненности рабочей жидкости механическими примесями. Форсирование режима по остальным параметрам (давление, температура, скорость и вибрации) целесообразно проводить в комплексе с форсированием в условиях определенно загрязненности рабочей жидкости.

Интенсивность износа деталей и увеличение утечек жидкости с ростом абсолютных величин перечисленных параметров будут увеличиваться. Это объясняется следующими причинами:

- 1) с ростом давления нагнетания увеличивается удельная нагрузка на поверхности деталей, а следовательно, и на абразивные частицы, имеющиеся в рабочей жидкости; в связи с ростом давления и, соответственно, увеличением утечек жидкости повышается количество абразивных частичек, проникших в зазор;
- 2) с увеличением скорости подвижных деталей возрастает скорость их износа;
- 3) при увеличении температуры рабочей жидкости изменяются ее физические свойства (уменьшается вязкость, ухудшаются смазочные свойства и т.п.), что способствует увеличению интенсивности износа деталей;
- 4) при работе агрегата в условиях вибраций скорость износа его деталей может увеличиваться в десятки раз по сравнению с условиями, при которых вибрации отсутствуют.

Третий метод (моделирование) предполагает получение количественных показателей надежности и долговечности устройств по результатам исследования их модели (электрических, электронных, механических и др.).

Применение методов моделирования в исследованиях надежности гидроприводов машин заслуживает большого внимания, поскольку они сулят целый ряд очень важных преимуществ: быстроту получения результатов, неограниченные возможности варьирования исследуемых параметров, возможность применения строгого математического аппарата и т.д.

Основной недостаток третьего метода заключается в том, что в модели никогда невозможно учесть все многообразие эксплуатационных, производственных и других факторов, которые оказывают влияние на характеристики исследуемого объекта. По этой причине модели, а следовательно, и результаты, полученные при их исследовании, получаются приближенными. Особого внимания заслуживает применение методов математического планирования экспериментов (МПЭ) с целью моделирования процессов функционирования устройств в системе.

Так, при исследовании надежности регуляторов гидравлических систем тракторов МТЗ-80 проводился факторный эксперимент в соответствии с несимметричным регулярным планом  $2^4 \cdot 10^1$  для четырех двухуровневых факторов ( $x_1$  – давление в системе;  $x_2$  – уровень загрязненности рабочей жидкости;  $x_3$  – температура рабочей жидкости;  $x_4$  – частота перемещения золотника) и фактора времени  $t$  на 10-ти уровнях. В результате получено выражение для утечек рабочей жидкости в зависимости от исследуемых факторов:

$$y = 6,87 + 0,1t - 0,08t^2 + 0,01t^3 + 0,4x_1t - 0,07x_1t^2 + 3,27x_2^2 + 0,01x_2t - 0,02x_2t^2 + 0,81x_3 + 0,03x_3t - 0,02x_4t + 0,04x_4t^2 + 1,38x_1x_2 - 0,05x_1x_2t - 1,35x_1x_3 + 0,07x_1x_3t + 0,06x_1x_3t^2$$

$$x_1 = (\bar{x}_1 - 3)/1; x_2 = (\bar{x}_2 - 0,005)/0,003;$$

$$x_3 = (\bar{x}_3 - 318)/1; x_4 = (\bar{x}_4 - 5)/2; N = 10.$$

Здесь  $N$  – количество уровней времени испытаний. Анализ подтверждает превалирующее влияние на надежность регуляторов частоты переключения золотника и уровня загрязненности жидкости (в 3 – 8 раз больше, чем влияние других исследуемых факторов).

Использование полученной модели для прогнозирования и ускоренной оценки надежности регуляторов с учетом изменений условий эксплуатации, а также других зависимых параметров предполагает такую последовательность действий:

1. Установление значений и пределов изменений независимых параметров.
2. Установление предельно допустимого значения зависимой переменной  $Y_{пред}$ .
3. Определение долговечности ( $t$ ).

Для обработки результатов экспериментов в настоящее время широко применяются ЭВМ.

## ТЕМА 7. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 7.1. Статистические методы анализа

Проблема обработки и анализа результатов экспериментальных исследований (лабораторных и производственных испытаний) имеет важнейшее значение для предприятия правильных решений как при создании, так и при эксплуатации гидравлических устройств. В связи с действием случайных факторов, результаты эксперимента всегда являются случайной величиной. Другими словами, случайная величина – это фактор (параметр), который под влиянием различных случайных причин может принимать различные, заранее неизвестные, значения. Параметрами случайных величин являются геометрические параметры устройств, конструктивные и физико-механические характеристики деталей, рабочих жидкостей, их ресурс и т.д.

На практике, как правило, анализируются результаты испытаний ограниченной выборки устройств. Поэтому основным математическим инструментом является статистическое определение вероятности характеристик.

Оценка среднего арифметического значения случайной величины производится по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

где  $n$  - общее число наблюдений случайной величины  $x_i$ .

Для статистической оценки рассеяния возможных значений случайной величины используется формула для среднестатистического отклонения:

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

Точность метода испытаний характеризуется коэффициентом вариации. Его эмпирическая характеристика подсчитывается по формуле:

$$v = \frac{S}{\bar{x}}.$$

Чем меньше величина  $v$ , тем выше стабильность случайной величины.

## 7.2. Вероятностно-статистические методы оценки надёжности устройств

Для оценки надёжности гидрооборудования, как и для технических изделий вообще, широко применяются методы теории вероятностей и математической статистики. Отметим некоторые общие положения этих методов. Одной из основных характеристик надёжности каждого вида устройств является срок службы  $t$  от начала эксплуатации до выхода из строя. Из практики известно, что при рассмотрении многих однотипных устройств срок их службы будет представлять ряд случайных величин. При этом исчерпывающей характеристикой данной случайной величины будет плотность распределения (дифференциальный закон распределения)  $f(t)$ .

При известной функции  $f(t)$  легко находятся следующие характеристики надёжности устройств:

1) вероятность безотказной работы устройства в течении времени  $t$

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

2) вероятность отказа устройства за некоторый промежуток времени от  $t$  до  $t+\Delta t$ :

$$dP(t) = f(t)dt$$

3) частота отказов устройств:

$$f'(t) = \frac{\Delta N}{N_0 \Delta t}$$

где  $\Delta N$  – количество устройств, отказавших в течении промежутка времени  $\Delta t$ ;  $N_0$  – первоначальное количество испытываемых устройств;

4) интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$$

5) средний срок службы устройств:

$$t_{cp} = \int_t^{\infty} tf(t)dt$$

6) гарантийный срок службы:

$$P_r = p(t_r)$$

Из приведённых зависимостей также следует, что если из трёх функций  $f(t)$ ,  $P(t)$  и известна какая-либо одна, то остальные две можно

легко найти.

Результаты экспериментов при испытаниях на надёжность обрабатываются с помощью методов математической статистики: данные при этом сводятся в таблицы и обрабатываются совместно. Затем устанавливается тип распределения оценочного параметра по времени.

Наиболее распространёнными на практике теоретическими распределениями времени исправного состояния технических изделий являются: логарифмические и нормальные распределения:

$$P(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} \int_t^{\infty} \frac{1}{x^e} - \frac{(\ln x - a)^2}{2S^2} dx, & x > a; \\ x \leq 0 \end{cases}$$

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(x-a)^2}{2S^2}} dx;$$

экспоненциальное распределение:

$$P(t) = \begin{cases} e^{-\lambda t}, & t \geq 0, \lambda \geq 0, \\ 0, & t \leq 0, \end{cases}$$

распределение Вейбула:

$$P(t) = \begin{cases} e^{-\frac{\lambda t^{\lambda+1}}{a^{\lambda+1}}}, & t \geq 0, a \geq 0, \lambda \geq 0, \end{cases}$$

где  $a$  – математическое ожидание времени исправной работы;  $S^2$  – дисперсия времени исправной работы,  $\lambda$  – интенсивность отказов;  $P(t)$  – вероятность безотказной работы.

Довольно часто для практических расчётов применяются комбинации (суперпозиции) различных распределений. В основе метода лежат исследования изменения основного оценочного показателя при испытании партии изделий на долговечность.

Рассмотрим особенности метода на примере оценки надёжности объёмных насосов. В качестве основного оценочного показателя выбираем объёмный КПД насоса. После того как по результатам эксперимента будет установлен тип распределения оценочного показателя по времени и определены параметры полученного распределителя, будут вычислены необходимые количественные показатели надёжности для конкретного типа насоса, эксплуатируемого при заданном условии.

При исследовании через определённые промежутки времени фиксируются производительности насоса, затем путём вычислений

определяются значения объёмного КПД.

Результаты испытаний насосов обрабатываются при помощи методов математической статистики. Сначала производится первичная обработка опытных данных, заключающаяся в их упорядочивании, построение ряда распределения. Эмпирический ряд распределения, который получается при обработке опытных данных, даёт возможность определить вероятность для заданного значения случайной величины весьма приблизительно, поскольку эмпирическая кривая плотности построена по ряду точек и поведение кривой между этими точками неизвестно. Поэтому необходимо описать распределение случайных величин теоритическим законом распределения.

Для выбранного теоритического закона распределения находятся пара метры, определяются доверительные интервалы для них. Для оценки того, насколько хорошо описывается данный ряд распределения, предлагаемые теоритическим законом распределения, могут быть использованы специальные критерии согласия или вероятностная бумага. Приёмы и последовательность статистической обработки результатов испытаний изложены в работах по теории надёжности математической статистике.

Таким образом, в результате испытаний насосов на долговечность и обработки экспериментальных данных будет определена функция плотности распределения оценочного параметра, которая позволит вычислить все необходимые количественные показатели надёжности исследуемого типа насоса. Приведём пример, поясняющий применение данного метода для их оценки надёжности насосов.

**Пример.** Испытаниям на долговечность подвергается партия насосов. В результате эксперимента для  $i$ -го промежутка времени найдены параметры нормального закона распределения и определены для них доверительные интервалы. Изменение оценочного критерия на всём протяжении времени испытаний носит случайный характер и наблюдается сильное перемещение реализаций изменения производительности насосов. Верхняя граница доверительного интервала для средней величины потери производительности и среднего квадратичного отношения соответственно равна  $\Delta Q=4$  л/мин;  $S_T=0.6$  л/мин (принятая величина доверительной вероятности  $\alpha=0,95$ ). Кроме того, известно предельное значение потери производительности насоса  $\Delta Q_{пред}=5,5$  л/мин. Требуется найти



вероятность безотказной работы насоса в момент времени  $t_1$ .

**Решение.**

1. Определяем значение квантили функций нормального распределения для заданного случая:

$$K = \frac{\Delta Q_{пред} - \Delta Q}{S} = \frac{5,5 - 4}{0,6} = 2,5$$

Достоверность результата при этом будет выше, чем больше объём выборки.

2. Используя таблицы квантилей нормального распределения, определяем вероятность безотказной работы насоса в момент  $t_i$ :

$$P(t_1) \cong 0,994$$

Имея выраженные графические зависимости  $\Delta Q_p = f(t)$  и  $S_p = f(t)$ , можно легко определить время работы насоса  $t$ , при котором будет обеспечена заданная вероятность безотказной работы  $P$ . (например,  $P=0,8; 0,9; 0,95; 0,99$  и т.д.)

**Примечание.** Индекс  $P$  в записанных выше выражениях для функций обозначает семейство кривых для различных значений вероятностей  $P$ .

В этом случае решаем задачу в следующей последовательности.

1. По заданному значению  $P(t)$ , используя таблицы квантилей нормального распределения, находим значение квантилей  $K$ .

$$P(t) \rightarrow K.$$

2. При известных  $K$  и  $S_p$  из формулы определения квантили функции нормального распределения находим значение  $\Delta Q_p$ :

$$\Delta Q_p = \Delta Q_{пред} - KS_p.$$

3. Используя график зависимости функции  $\Delta Q_p = f(t)$ , находим численное значение долговечности насоса  $t_p$ , соответствующее заданной вероятности бесконтактной работы  $P(t)$ .

Этот метод оценки надёжности позволяет осуществлять прогнозирование долговечности насосов. Так, имея диагностическое выражение функции  $\Delta Q = f(t)$  для типа насосов, можно путём кратковременных испытаний партии насосов определять значения параметров проведённой выше функции. Зная параметры функции и предназначенные значения утечек, легко построить график зависимости  $\Delta Q_r = f(t)$ , а также определить значение долговечности  $t$  для заданной вероятности бесконтактной работы  $P$ . Пользуясь

выражением  $\Delta Q_r = f(t)$ , можно также корректировать значение  $t$  для конкретного насоса.

Применение метода оценки надёжности гидроустройств с учётом рассеивания ошибочных показателей позволяет использовать следующие основные его преимущества:

1) производить оценку надёжности и долговечности устройств, используя результаты кратковременных испытаний которые могут быть проведены в заводских условиях;

2) в определённых случаях осуществлять прогнозирование долговечности устройств;

3) благодаря применению хорошо обработанного математического аппарата получить довольно высокую достоверность всех расчётов.

Недостаток метода заключается в том, что он требует испытаний значительного количества объектов больших мощностей испытательного оборудования. Применять метод наиболее целесообразно при испытаниях относительно недорогих образцов изделий при налаженном массовом их производстве.

Довольно часто на практике возникает задача оценки долговечности и надёжности гидropневмоустройств и сложность его изготовления зачастую не позволяет изготовить большую партию образцов и испытания проводятся на нескольких объектах. При этом целесообразно рассматривать вопрос о контроле безотказности опытных изделий. За критерий безотказности следует принимать наработку  $T$  на отказ. Величина  $T$  должна быть записана в технические условия на испытываемый объект.

Контроль безотказности следует проводить для тех изделий, которые уже прошли период приработки. Если же по каким-либо причинам не удаётся учесть период приработки, то установленная в этом случае надёжность изделия будет занижена (с определённым запасом).

Задача ставится таким образом, чтобы обработка на отказ  $T_{on}$  для опытных насосов была не ниже  $T$ :

$$T_{on} \geq T.$$

Длительность испытаний гидropневмоустройств может быть разная:  $t_1, t_2 \dots t_n$

Опытная наработка на отказ определяется по формуле:

$$T_{on} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{m},$$

где  $m$  – суммарное число отказов.

Поскольку у большинства элементов гидропневмоустройств распределение наработки до отказа отличается от экспоненциального, то распределение числа отказов будет подчиняться закону Пуассона только приблизительно. Точность в этом случае зависит от числа элементов и длительности испытаний. Чем больше длительность испытаний насосов и чем больше элементов входит в продукцию, тем точнее распределение числа отказов будет описываться законом Пуассона. Известно, что практически поток отказов можно считать пуассоновским для аппаратуры из сложных элементов с постепенным отказом при выполнении условия:

$$\frac{n}{a} = 10,$$

где  $n$  – число элементов;  $a$  – среднее число отказов. В остальных случаях целесообразно вводить поправку в соответствующие пуассоновской аппроксимации с помощью приближенных или точных методов.

Приняв поток отказов пуассоновским, находим доверительные пределы для определения нами  $T_{on}$ :

$$\begin{aligned} T_{ниж} &= r^2 T_{on}; \\ T_{верх} &= r_1 T_{on}. \end{aligned}$$

При известной доверительной вероятности  $\alpha$  и числе отказов на коэффициенты  $r_1$  и  $r_2$  находятся из таблиц.

На практике могут иметь место следующие три случая:

$$\begin{aligned} T_{ниж} &\geq T; \\ T_{верх} &\leq T; \\ T_{ниж} &\leq T \leq T_{верх}. \end{aligned}$$

В первом случае можно утверждать, что требования технических условий выполнены (с риском ошибки не больше  $1-\alpha$ ).

Во втором случае требования технических условий не выполняются (с риском ошибки не больше  $1-\alpha$ ).

В третьем случае требуется продолжить испытания для принятия решения о безотказности испытываемых устройств. Есть

ещё один путь принятия решения – уменьшить доверительную вероятность  $\alpha$ , что равномерно увеличению степени риска.

**Пример.** Десять насосов подвергаются испытаниям на долговечность. Суммарная наработка в определяемый момент времени составляла  $\sum_{i=1}^{10} t_1 = 7000$  ч; за время испытаний получено десять отказов. Кроме того, в технических условиях задано значение наработки на отказ  $T=1000$ ч . Требуется оценить безотказность данного типа насосов.

1. Определяем опытную наработку на отказ:

$$T_{on} = \frac{\sum_{i=1}^{10} t_1}{m} = \frac{7000}{10} = 700 \text{ ч.}$$

2. Приняв значение доверительной вероятности  $\alpha=0,9$  и зная число испытываемых насосов  $n=10$ , по таблицам значений пределов для распределения Стьюдента находим значения коэффициентов  $r_1$  и  $r_2$ :

$$r_1 = 1,61 ; r_2 = 0,65$$

3. Определяем доверительные границы для выработки на отказ:

$$T_{ниж} = r_2 T_{on} = 0,65 \cdot 700 = 455 \text{ ч.}$$

$$T_{верх} = r_1 T_{on} = 1,61 \cdot 700 = 1125 \text{ ч.}$$

Анализируя результаты, видим, что заданное в технических условиях значения наработки на отказ находится в интервале между  $T_{ниж}$  и  $T_{верх}$ :

$$455 < 1000 < 1125.$$

Окончательного решения о соответствии насосов данного типа требованием технических условий в данном случае принять нельзя. Необходимо или продолжить испытания, или задаться меньшим значением доверительной вероятности (увеличить степень риска).

Допустим, что мы остановились на последней мере – уменьшаем вероятность  $\alpha$  ( $\alpha=0,8$ ). Снова находим значения коэффициентов  $r_1$  и  $r_2$ , соответствующих заданному  $\alpha$ :

$$r_1 = 1,37, r_2 = 0,73$$

Затем определяем значения  $T_{ниж}$  и  $T_{верх}$ :

$$T_{ниж} = 0,73 \cdot 700 = 511 \text{ ч.}$$

$$T_{верх} = 1,37 \cdot 700 = 959 \text{ ч.}$$

Теперь можно сделать вывод, что технические условия не выполняются. При этом мы допускаем степень риска

$$1-\alpha=0,2.$$

Рассмотренный выше метод можно рекомендовать для контроля безотказности опытных образцов гидрооборудования. Отличительными особенностями сложных гидроустройств является сложность конструкции, относительно высокая их стоимость значительная трудоемкость изготовления. Массовые испытания таких устройств на долговечность, особенно на стадии опытно-конструкторских разработок, представляет большую техническую трудность. Доводка конструкции обычно осуществляется всего лишь на нескольких образцах. Для того чтобы в ходе выполнения программы опытно-конструкторских разработок и доводочных испытаний опытных образцов оценить способность гидроустройства надежно выполнять рабочие функции, необходимо рассматривать следующие задачи:

- 1) возможность получить максимальную информацию по надёжности агрегата а процессе опытно-конструкторских разработок, когда задачи испытаний отличаются друг от друга, а конструкция гидроустройства перетерпывает непрерывные изменения;
- 2) получить удовлетворительные оценки надёжности по результатам небольшого количества испытаний;
- 3) надёжность устройства оценивать по результатам стендовых испытаний, поскольку на стадии конструкторской разработки и доводки ещё не представляется возможным проводить эксплуатационные испытания.

Ввиду того, что для испытаний на долговечность выделены единицы изделий, то для получения достоверных данных по надёжности необходимо согласовать цели и задачи обычных технических испытаний с целями испытаний на надёжность. Для этого предлагается производить разбивку конструкции устройства на основные узлы, четко разграничивать условия приемлемости и исключения по каждому узлу, необходимо также выбрать критерии для определения приемлемости каждого узла.

На примере конструкции бесшатунного аксиально-поршневого насоса с торцевым распределением жидкости рассмотрим, как можно

производить разбивку на узлы и назначить оценочные критерии по каждому узлу.

Для данного насоса рассматриваем пять типов основных узлов:

А. Ротор - распределительный диск;

Б. Плунжерная пара;

В. Узел ведения (подшипники, опорный диск, прижимной диск, сферическая втулка, распорная пружина);

Г. Механизм управления (поворотный гидроцилиндр, вспомогательный насос, клапаны);

Д. Узел всасывания (клапаны, магистраль всасывания).

Надёжность насоса оценивается по результатам испытаний указанных узлов. Чтобы определить приемлемость, назначаем оценочные критерии по каждому узлу (табл.7.1).

**Таблица 7.1 – Характеристики приемлемости узлов насоса**

Узел насоса	Характеристики приемлемости
А Ротор - распределительный диск	1. Конструкция деталей узла должна соответствовать утверждённым чертежам. 2. Термообработка, материал, технология должны соответствовать ТУ.
Б Плунжерная пара	То же, что и узла А.
В Узел ведения	То же, что для узлов А и Б.
Г Механизм управления	1. Конструкция насоса включает в себя полностью все элементы конкретной системы управления. 2. Время срабатывания и количество срабатываний должны быть не меньше указанных в техническом задании для данной модели насоса.
Д Узел всасывания	1. Конструкция деталей узла должна соответствовать утверждённым чертежам. 2. Время срабатывания и количество срабатываний не должны быть меньше указанных в техническом задании для модели насоса.

Любые из названных узлов подлежат исключению перед испытаниями или в процессе испытаний в случае несоответствия характеристикам приемлемости.

Метод оценки надёжности при такой системе испытаний зависимости в следующем определяются числа приемлемых испытаний каждого узла, наименьшее из этих чисел ( $N$ ) характеризует

количество проведённых эквивалентных испытаний насосов. В результате получим распределение отказов для заданного числа эквивалентных испытаний насосов, которое может быть записано в виде  $(N, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5)$ , где  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$  – числа отказов отдельных узлов, а  $f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$  – общее число отказов за период проведения  $N$  эквивалентных испытаний насосов.

По данным испытаний может быть вычислено минимальное значение надёжности всего насоса при заданном доверительном интервале. Этот этап испытаний удобен ещё и тем, что позволяет получать характеристики безотказности отдельных узлов насоса путём их обособленных испытаний.

В случае, когда проводятся испытания на долговечность какого-либо отдельного узла насоса, остальные узлы при этом считаются неприемлемыми. Результаты испытания такого узла вместе с регулированием испытаний других узлов используются затем для оценки долговечности системы (износа). Это позволяет сократить время, необходимое для получения необходимой информации о долговечности насоса.

Рассмотрим один из способов обработки данных при использовании описанного выше метода испытаний.

**Пример.** Насос роторно-поршневого типа следует рассматривать как сложно восстанавливаемое изделие, состоящее из значительного числа узлов. Оценку его надёжности на стадии опытно-конструкторских разработок и долговечных испытаний можно проводить, используя опытный параметр потока отказа  $\lambda$ . Если для конкретного узла известна величина средней наработки на отказ, то при достаточной длительности времени испытаний параметр потока отказов будет:

$$\Lambda_i = \frac{1}{t_{icp}}$$

Значение средней наработки на отказ  $t_{icp}$  для узла можно выводить двояким способом. Для расчета можно принять следующую схему:  $i$ -й узел испытываем до выхода из строя, затем восстанавливаем его (время восстанавливающего в расчёт не принимаем, считаем  $t_{восст}=0$ ) и продолжаем испытания до следующего отказа, что произведена замена вышедшего из строя узла новым, и т.д. до получения отказа. Средняя наработка на отказ в этом случае равна:

$$t_{icp} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{m}.$$

Если в результате испытаний на долговечность, возможно определить функцию плотности распределения срока службы  $f(t)$  для узла, то тогда средний срок службы легко находится из формулы:

$$t_{icp} = \int_t^{\infty} tf(t)dt$$

Запишем выражение для параметров потока отказов насоса в целом:

$$\Lambda = \frac{1}{T} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{t_{icp}},$$

где  $k$  – число узлов.

Для описания распределения отказов насоса воспользуемся законом Пуассона. Точность допущения будет зависеть от числа элементов и длительности испытаний, как уже указывалось выше. Выражение для среднеквадратического отклонения параметра  $\Lambda_i$  запишется следующим образом:

$$\sigma(\Lambda_i) = \frac{\sqrt{m_i}}{t_i}$$

Соответственно дисперсия параметра потока отказов  $L$  износа в целом равна:

$$S(\Lambda_i) = \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{t_i^2}$$

При окончательных  $k$  ( $k > 25$ ) можно приблизительно считать, что параметр потока отказов распределён по нормальному закону. Приняв такое допущение, можно записать приблизительные выражения для доверительных границ параметра потока отказов:

$$\Lambda_{ниж} = \Lambda - U_2 S(\Lambda);$$

$$\Lambda_{верх} = \Lambda + U_2 S(\Lambda),$$

где  $U_2$  – квантиль нормального распределения, отвечающий доверительной вероятности  $\alpha$ ;  $\Lambda$  и  $S(\Lambda)$  определяется из выражений. Значения доверительных границ для наработки на отказ можно определить из выражений:



$$T_{ниж} = \frac{1}{\Lambda_{верх}}; \quad T_{верх} = \frac{1}{T_{ниж}}.$$

Преимуществом такого метода (дифференциального) оценки надёжности гидроустройств является то, что он позволяет получать данные о надёжности и долговечности по результатам испытаний опытных образцов изделий. Кроме того, возможно использование результатов обособленных испытаний отдельных узлов гидроустройств, что значительно сокращает время испытаний и затраты на изготовление сложного испытательного оборудования.

Поскольку для описания распределения отказов насоса применяется закон Пуассона, то точность результатов будет зависеть от числа узлов элементов насоса, а также от длительности испытаний. Длительности испытаний насоса, при этом должна быть большей, что обусловит лучшую достоверность результатов.

Проблемным вопросом в технике является оценка надёжности систем, больших уникальных устройств и комплексов. Для таких устройств характерна сложность, сильное взаимодействие отдельных узлов и частей при работе устройства, мелкосерийное и единичное производство. Методы оценки, которые рекомендуются для крупносерийного производства и особенно в электронной промышленности, оказываются, к сожалению, не эффективными. Поэтому при разработке такого типа устройств необходимо стремиться к обеспечению максимальной надёжности их путем повышения качества эффективности и проектирования, а также организации испытаний.

На стадии проектирования необходимо производить тщательный поток соответствия несущей способности конструкции расчетным нагрузкам. Вождение коэффициентов запасов, по отношению к расчетным нагрузкам само по себе еще не приводит к увеличению надёжности изделия. Минимальное качество отрицательных факторов, оказывающих разброс характеристик и долю случайных отрицательных факторов. К таким мероприятиям строгого контроля технологии, контроля характеристик комплектующих изделий, улучшение конструкции, проверка его эффективности и т.д.

Для изучения влияния различных факторов и их сочетаний на работоспособность конструкции следует использовать моделирование на ЭВМ. Конечно, следует помнить, что любая модель не может заменить полностью натуральных испытаний, и при необходимости

получения довольно точных установок надёжности нужно проводить испытания полноразмерных изделий и их элементов.

Программу испытаний сложных и уникальных технических устройств необходимо строить так, чтобы обеспечивать надёжность при сведении к минимуму статической неопределённости результатов испытаний. Проведение испытаний отдельных элементов устройств, при крайних значениях параметров эксплуатационных нагрузок позволяет значительно быстрее добиваться необходимого уравнения надёжности.

Имеются рекомендации об условном расчленении системы на части. Если каждую такую часть считать независимым элементом, то надёжность системы определить, используя вышеизложенный способ оценки сложных гидравлических устройств.

Следует помнить что основной целью испытаний гидравлических систем является не только количественная оценка надёжности и долговечности, а главное, изучение изменения основных параметров системы в течении времени эксплуатации и в различных условиях. При этом важно выявить и устранить недостатки проектирования и изготовления (так называние «слабые места») и, основываясь на результатах испытаний, разработать эффективные методы обеспечения заданной надёжности конкретных устройств.

При разработке сложных гидравлических систем целесообразно применять так называемые комбинированные испытания и анализ. Суть таких испытаний заключается в следующем: испытаниям подвергаются две системы – одна на предельном режиме, другая при воздействии реальных эксплуатационных нагрузок. Уровни воздействия предельных нагрузок выбираются с учётом того, чтобы режим был не слишком тяжёлым, но обеспечивал бы воздействие всех слабых мест конструкции и возможных причин отказов гидроустройств в эксплуатации. Такие испытания не позволяют оценить надёжность систем на основании статистического материала, однако дают возможность убедиться в их работоспособности и выработать необходимые рекомендации как по необходимым доработкам конструкции, так и по проведению дальнейших испытаний. Как правило, при этом следует проводить испытания представительных партий особо ответственных узлов и отдельных агрегатов.

Наиболее достоверная оценка надёжности гидропривода может быть проведена на основании результатов испытаний на

долговечность, как полноразмерных систем, так и отдельных их элементов.

Практика исследований и разработок устройств гидропривода подтверждает, что на стадии разработки гидросистем наиболее целесообразно строить программу испытаний так, чтобы испытаниям полноразмерных приводов предшествовали испытания отдельных узлов и элементов с учетом спектра эксплуатационных нагрузок. При этом значительно сокращаются сроки отработки конструкции для обеспечения требуемой надежности.

### 7.3. Определение случайной ошибки при измерениях

Известно, что результаты всех экспериментов содержат определенные ошибки. Они могут быть как существенными, так и ничтожно малыми. Уметь их правильно оценивать и учитывать очень важно. Любые небрежности к неопределенности в этом деле могут привести к значительным убыткам, дорогостоящим неполадкам, непроизводительной потере времени и труда. Основными источниками ошибок являются:

- 1) инструментальные и методические погрешности приборов, стендов и программного обеспечения,
- 2) неточные действия оператора в процессе испытаний (измерений);
- 3) влияние неучтенных внешних условий.

При проведении эксперимента перечисленные источники погрешностей приводят к двум основным классам ошибок: случайным и систематическим.

Считаем, что *случайная ошибка* имеет место, когда при последовательных измерениях постоянной величины получают различные ее численные значения.

*Систематическая ошибка* наблюдается в тех случаях, когда среднее значение последовательных отсчетов отклоняется от известного точного значения и продолжает отклоняться от известного точного значения независимо от числа последовательных отсчетов.

Прибор может иметь очень малый разброс показаний, но результаты будут неверными вследствие наличия систематической ошибки. *Пример*: тахометр дает показания: 950, 952, 948, 951 и 950 об/мин при истинной скорости вращения 1000 об/мин. Прибор можно откалибровать и использовать.

Прибор может давать большой разброс показаний и в то же время не иметь систематическую ошибку. *Пример*: тахометр дает

показания: 910, 1050, 990, 1030, 1080, 890, 1050, 1060 об/мин. Истинная скорость вращения составляет 1000 об/мин, что равно среднему значению для данной группы показаний. Это свидетельствует о том, что, хотя показания тахометра и характеризуются большим разбросом, прибор не дает систематической ошибки. Прибор в этом случае необходимо заменить или отремонтировать.



Рисунок 7.1 – Возможные результаты калибровки неисправного манометра с помощью манометра с весовой нагрузкой

Калибровка позволяет лишь улучшить характеристики приборов, имеющих малый разброс показаний и большую систематическую ошибку.

Например, пусть необходимо откалибровать датчик давления, используя манометр, который подает на вход датчика последовательность точно известных значений давления. Подавая известные значения давления, равные 0,05; 0,1; 0,15 МПа и т.д., записываем фактические показания датчика и строим *калибровочную кривую*, изображенную на рисунке 7.1, а затем эта кривая используется для нанесения на шкалу прибора точных отсчетов. Допустим, что механизм прибора «заедает» либо имеет мертвый ход или, возможно, образовалась незначительная течь в тонкостенной трубе Бурдона. Такие дефекты могут приводить к ошибочным показаниям, и прибор будет иметь как систематическую, так и случайную ошибку.

В данном случае калибровочная кривая мало повлияет на точность отсчетов. При повторном использовании манометра с весовой нагрузкой для проверки датчика при каждом значении давления можно получить график, изображенный на рисунке 8.1, б. Такой график дает наглядное представление о непригодности данного прибора. Ясно, что прибор не только дает большой разброс показаний (что видно из рис. 7.1, а), но и имеет большую систематическую ошибку и его нужно либо отремонтировать, либо утилизировать.

Часто можно встретить прибор, на шкале которого указано, что измеренное значение имеет ошибку, равную плюс-минус несколько процентов деления шкалы. Например, на манометре можно прочесть: « $\pm 5\%$  во всех диапазонах». В этом случае возникает вопрос, представляют эти  $\pm 5\%$  среднее квадратическое отклонение или вероятную ошибку. Если имеется в виду среднее квадратическое отклонение, то немногим более 68% отклонений будет находиться в указанном интервале.

В действительности ошибки прибора могут быть распределены не по нормальному закону, поэтому, даже если среднее квадратическое отклонение и известно, нельзя в точности предсказать, какой именно процент отклонений будет заключен в интервале  $\pm \sigma$ . В этом случае проще задавать процент отсчетов, заключенных в некотором интервале.

Часто на приборе вообще не указана его точность. В этом случае можно воспользоваться приближенным практическим правилом,

которое состоит в следующем: максимальная ошибка равна половине наименьшего деления на шкале прибора можно ожидать, что только в одном случае из двадцати или даже в одном из 100 отклонение превысит данное значение. Заметим, что в диапазоне от 0 до 1 кг/см<sup>2</sup> прибор имеет меньшую точность, что характерно для таких недорогих приборов, как манометры с трубкой Бурдона.

При выполнении важного эксперимента следует провести проверку или калибровку прибора. Быстрым и простым способом проверки является нанесение отклонений на вероятностную бумагу. Это графическая бумага, на которой нормально распределенная совокупность отсчетов образует прямую линию.

На оси  $x$  откладываются отклонения; при этом нуль помещается в середине листа и шкала выбирается таким образом, чтобы охватить весь интервал значений имеющихся данных. Шкала по оси  $y$  представляет процент отсчетов, имеющих отклонение, меньшее данного значения  $x$ .

В качестве примера рассмотрим распределение твердости по Бринеллю на металлическом образце, твердость которого известна. Получены следующие отклонения от точного значения диаметра углубления от индентора: одно отклонение -0,20 мм; одно отклонение -0,10 мм; четыре отклонения -0,05 мм; 13 нулевых отклонений; семь отклонений +0,05 мм; четыре отклонения +0,1 мм и одно отклонение +0,20 мм. Все результаты округлены до 0,05 мм. Определим, распределены ли данные этой выборки по нормальному закону.

Для этого составим таблицу, которая позволила бы наносить данные измерений непосредственно на вероятностную бумагу:

Таблица 7.2 – Анализ отклонений показаний твердомера

Отклонение	Число отклонений, не превышающих данного	Процент отклонений, не превышающих данного
-0,20	1	3,2
-0,15	1	3,2
-0,10	2	6,4
-0,05	6	19,4
0	19	61,2
+0,05	26	84
+0,10	30	97
+0,15	30	97
+0,20	31	100

Данные из первого и третьего столбцов этой таблицы нанесены на график, изображенный на рисунке 7.2. Видим, что полученная кривая проходит вблизи точки  $(x=0, y=50\%)$ , которую должно пересекать любое симметричное распределение, включая нормальное. Если пренебречь четырьмя внешними точками, то пять внутренних образуют линию, довольно близкую к прямой. Это свидетельствует о том, что рассматриваемая выборка является частью бесконечной генеральной совокупности, имеющей нормальное распределение.

Асимметрия распределения имеет место, когда кривая обладает более крутым наклоном в одну сторону относительно максимума, чем в другую. В случае асимметричного распределения на вероятностной бумаге можно получить почти прямую линию, но она никогда не пройдет через центральную точку  $(x = 0, y = 50 \%)$ .

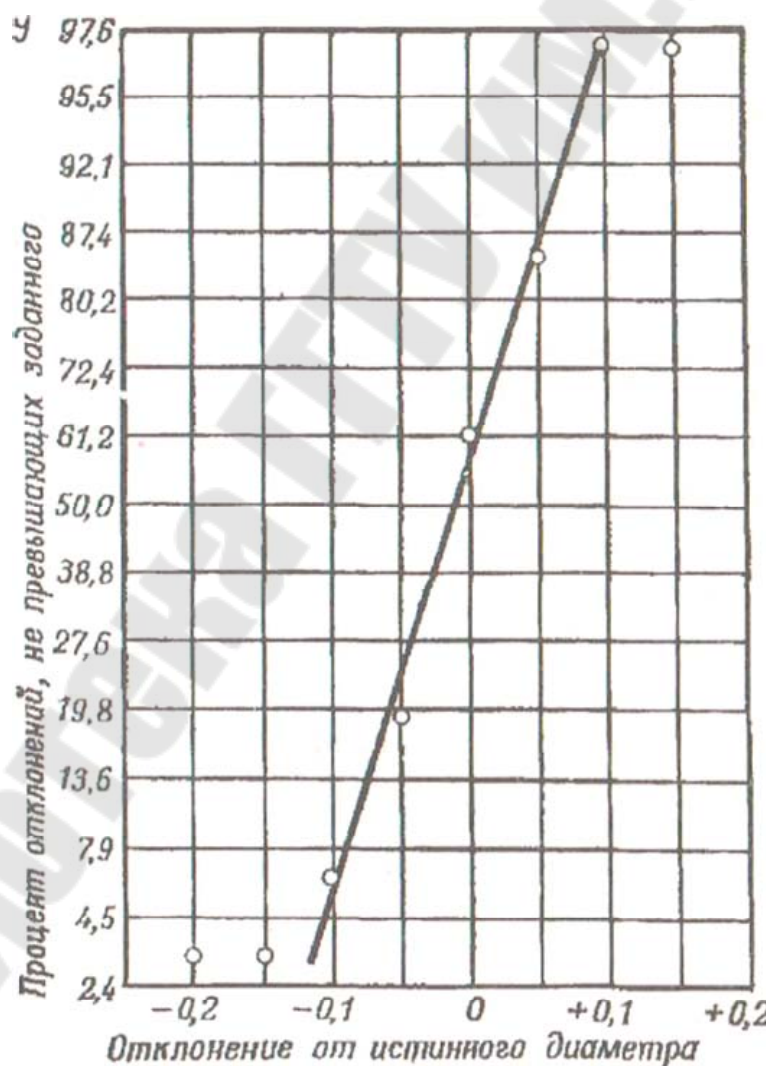


Рисунок 7.2 –Графическое представление экспериментальных данных на вероятностной бумаге

Все ошибки, появляющиеся при эксперименте, можно рассматривать как сумму ошибок двух видов - систематической и случайной. Во многих экспериментах невозможно выделить систематическую и случайную составляющие, если невозможно прокалибровать или проверить измерительную аппаратуру. В таких случаях необходимо оценивать неопределенность. При этом считаем, что неопределенность обусловлена лишь случайными ошибками, и задаемся некоторым распределением значений относительно истинного отсчета. Часто принимается допущение о нормальном законе, который знаком большинству экспериментаторов.

Отклонения показаний неточного прибора могут иметь различные распределения, часто принимается допущение о нормальном законе, который достаточно хорошо изучен с математической точки зрения. Если распределение является приближенно нормальным, а это можно проверить путем построения графика на вероятностной бумаге, то легко определить долю отклонений, величина которых не превышает одного или нескольких значений показателей точности. Эти значения, взятые со знаками плюс и минус, характеризуют пределы, в которых находится различный процент общего числа отсчетов, взятых из бесконечной совокупности. Если точное значение измеряемой величины неизвестно, то в качестве его оценки можно принять среднее значение при условии, что распределение отклонений не отличается существенно от нормального. Эту оценку можно уточнять, беря все большее число отсчетов, однако повышение точности происходит медленно, пропорционально квадратному корню из числа отсчетов. Независимо от того, получено точное значение путем калибровки или усреднением отсчетов, можно вычислить выборочное среднее квадратическое отклонение. После этого с помощью простых соотношений можно определить любые другие показатели точности (при условии, что отклонения имеют нормальное распределение).

Если по своему характеру эксперимент допускает наличие ошибки, превышающей два-три средних квадратических отклонения, то достаточно одного отсчета. Когда допускаемое отклонение примерно равно вероятностной ошибке прибора, половина всех отсчетов будет выходить за пределы требуемой точности. Если данная величина измеряется четыре раза, то можно ожидать, что в среднем точность удвоится по сравнению с точностью одного отсчета, а два средних по двум отсчетам будут лежать в интервале



между этими отсчетами. При девяти отсчетах получаем три средних значения, лежащие внутри интервалов, образуемых этими отсчетами.

Если допускаемое отклонение не превышает половины вероятностной ошибки, то необходимо делать как можно больше повторных отсчетов или по возможности заменить прибор.

При экспериментальных исследованиях следует постоянно иметь в виду, что проводя анализ результатов измерений, возможно, допустить ошибки двух видов: ошибки первого рода, когда полученным данным ошибочно присваивается эффект, которого в действительности нет, и ошибки второго рода, когда экспериментатор ошибочно исключает значимый эффект. Эти два вида ошибок являются взаимозависимыми, поэтому при планировании и анализе экспериментов необходимо осторожно «балансировать» между этими двумя видами ошибок. При этом обычно используют критерий  $y_i$ , устанавливающий вероятность совпадения (или отличия) наблюдаемых данных с ожидаемыми результатами:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_1 - m_2)^2}{m_2},$$

где  $m_1$  и  $m_2$  - соответственно эмпирические и теоретические частоты;  $k$  - число разрядов интервалов разбиения совокупности.

Также определяется число степеней свободы  $f$ :

$$f = k - \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  - число параметров теоретического распределения плюс 1.

Затем по значениям  $f$  и  $\chi^2$  с помощью таблицы функции распределения  $\chi^2$  определяется вероятность  $P$  совпадения (или отличия) эмпирических и теоретических распределений наблюдаемых величин. Если эта вероятность мала (меньше 0,1), то гипотеза отбрасывается как неправдоподобная. Если она же относительно велика, то можно принятую гипотезу признать соответствующей опытными данным.

В ряде случаев для оценки результатов экспериментов используются коэффициенты корреляции, регрессионный и дисперсионный анализ.

Критерий  $\chi^2$  применяется, когда в процессе анализа рассматриваются целые числа. Когда же используются проценты, дробные числа и т.п., то более подходящим оценочным критерием является критерий  $t$  Стьюдента. Для проверки различия между двумя

средними формула для критерия  $t$  Стьюдента имеет вид  $n_a, n_b$  соответственно объем выборки  $A$  и  $B$ ;

$$t = \frac{\bar{x}_a - \bar{x}_b}{S_{\text{сум}} \sqrt{\frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_b}}},$$

где  $\bar{x}_a$  - среднее для выборки  $A$ ;  $\bar{x}_b$  - среднее для выборки  $B$ ;

$S_{\text{сум}} = \sqrt{\frac{\sum x_a^2 + \sum x_b^2}{n_a + n_b - 2}}$  - среднеквадратическое отклонение для обоих

выборок;

$n_a, n_b$  - соответственно объем выборки  $A$  и  $B$ .

С помощью вероятностных таблиц или графиков определяем вероятность  $t$ , т. е. того, что оба средних значения относятся к одной и той же совокупности (справедливость принятой гипотезы).

Важным при испытаниях является сравнение изменчивости (размаха) двух или более выборок. Для этого применяются методы дисперсионного анализа, в частности, оценка по критерию Фишера  $F$ :

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2},$$

где  $S_1$  и  $S_2$  - соответственно дисперсии значений первой и второй групп результатов.

Для проверки случайности появления 1 группы событий (результатов) эмпирическое распределение проверяется на соответствие пуассоновскому распределению, которое, в отличие от нормального, является асимметричным и описывает вероятность появления случайных событий.

При этом вычисляется среднее число событий в определенном интервале времени:

$$m = \frac{P}{N},$$

где  $P$  - общее число событий;  $N$  - общее число интервалов времени или участков.

Соответствие эмпирического распределения пуассоновскому устанавливается с помощью статистических таблиц и критерия  $\chi^2$ . Этим определяется вероятность случайности появления группы событий (результатов).

Следует особо отметить то обстоятельство, что, в принципе, не существует какого-либо твердого правила (критерия), устанавливающего, когда какой из ошибок (первого или второго рода) отдавать предпочтение, принятие решения в таких случаях зависит от множества факторов и конкретных условий.

## **ТЕМА 8. МЕТОДЫ АППРОКСИМАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭМПИРИЧЕСКИМИ ЗАВИСИМОСТЯМИ**

### **8.1. Графические методы обработки результатов опытов**

В практике исследований нашли широкое распространение графические методы представления результатов экспериментов. Основное их преимущество - наглядность и минимальная математическая обработка.

Чаще всего графические зависимости строят в двухосевой прямоугольной системе координат  $OXY$ , где  $O$  - начало координат,  $X$  и  $Y$  - взаимно перпендикулярные оси координат.

Так, наиболее распространенным и точным способом построения на плоскости  $XU$  прямой по группе экспериментальных точек является метод наименьших квадратов. Основная суть его заключается в следующем.

Пусть независимая переменная  $X$  варьируется в некотором интервале значений, а с измерительного прибора считываются значения зависимой переменной  $Y$ . Как значения  $X$ , так и значения  $Y$  имеют случайную ошибку. Можно утверждать, что наилучшая линия, проходящая через множество точек на плоскости  $XU$ , будет занимать положение, при котором сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от этой линии минимальна.

Если уравнение прямой записать в виде:

$$Y = aX + b,$$

то задача заключается в получении таких выражений для  $a$  и  $b$ , чтобы сумма квадратов отклонений переменной  $Y$  от прямой была минимальной.

В этом случае должны выполняться условия:

$$\frac{\partial \sum (Y - aX - b)^2}{\partial a} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \sum (Y - aX - b)^2}{\partial b} = 0$$

В виде статистических зависимостей, записанных выше, выражения представляются уравнениями:

$$\begin{aligned}
 b \sum X + a \sum X^2 &= \sum XY \\
 nb + a \sum X &= \sum X
 \end{aligned}$$

Решая полученные уравнения, находим коэффициенты уравнения прямой  $a$  и  $b$ :

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}; \\
 b &= \frac{\sum X^2 \sum Y - \sum X \sum XY}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}
 \end{aligned}$$

Если прямая проходит через начало координат, то

$$a = \frac{\sum XY}{\sum X^2}$$

В экспериментальной работе часто возникает ситуация, когда по представленным на графике в виде прямой данным необходимо найти ее уравнение. Такое уравнение называют эмпирическим, поскольку оно находится с использованием эмпирических данных, а не теоретических соображений.

Если полученные экспериментальные данные в обычной системе координат  $OXY$  не образуют прямой, то иногда удобно представить зависимость; логарифмических координатах. Так, степенная зависимость:

$$Y = kX^a,$$

в логарифмическом выражении имеет вид прямой:

$$\log Y = \log k + a \log X,$$

где  $a$  и  $k$  — коэффициенты.

Имеется также полулогарифмическая бумага для построения графических зависимостей. Здесь одна шкала является логарифмической, а другая - линейной. На ней в виде прямой изображается функция вида

$$Y = k (10)^{aX}.$$

После преобразования функция запишется в виде:

$$\log Y = \log k + aX.$$

При построении графических зависимостей необходимо, чтобы минимальное деление шкалы графической бумаги примерно соответствовало вероятностной ошибке измеряемой величины. Это

значительно облегчает установление характера зависимости и закономерности ее изменения.

В случае изображения зависимости в виде прямой облегчается применение методов экстраполяции для проверки соответствия данных и упрощается вычисление статистических показателей.

## **8.2. Математический анализ данных испытаний и методы подбора эмпирических формул**

Практика экспериментальных исследований подтверждает, что вывод большинства аналитических зависимостей основан на статистических методах. Часть их связана с графическими построениями и численными математическими методами.

Известна обширная литература по математическому анализу экспериментальных данных. Мы коснемся только наиболее распространенных приемов. Большое число других вопросов освещены в специальной и справочной литературе.

Во многих экспериментах преобразование данных не позволяет получить линейный график. Необходимо подбирать другие функции. Наиболее широко используется многочлен (полином):

$$Y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots + nx^n .$$

Здесь первые два члена представляют уравнение прямой, три члена - параболы. Увеличение числа членов позволяет подобрать более сложные кривые.

Если точки на графике образуют плавную кривую, то такие графики можно использовать также для интерполяции данных. Интерполяция может также выполняться различными численными методами. Наиболее часто используется известный метод линейной интерполяции.

Кратко рассмотрим метод, основанный на применении интерполяционной формулы Лагранжа.

Если при проведении эксперимента были получены точки  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  и требуется найти  $y$  при значениях  $x$ , которое не было установлено при испытаниях, то используется формула линейной интерполяции Лагранжа, которая даёт также приемлемую точность для небольших интервалов экстраполяции.

В отличие от графиков и таблиц, формулы позволяют проводить последующий строгий математический анализ результатов испытаний. Подобрав общее уравнение кривой, его можно при необходимости интегрировать, дифференцировать и выполнять над

ним другие операции с целью отыскания и объяснения характерных точек и моментов.

Выше уже упоминалась роль ЭВМ в проведении экспериментов. Подчеркивая еще раз важность этого направления, отметим, что самые сложные технические (гидропневматические) системы можно легко моделировать на ЭВМ с помощью последовательности взаимосвязанных уравнений, описывающих схему поведения той или иной системы.

Системы уравнений решаются при различных значениях входных параметров, что позволяет исследовать необходимую область переменных и соотношений между входными и выходными величинами.

Таким образом, моделирование дает возможность исследователю полностью провести эксперимент на вычислительной машине. Следует, однако, помнить, что хотя при этом не существует проблемы точности приборов, ошибка возможна из-за неопределенностей физических свойств и констант, используемых в программах для моделирования.

Моделирование на ЭВМ может дополниться анализом размерностей и доведением факторного эксперимента, позволяющими сокращать число исследуемых вариантов.

Автоматизация испытаний гидропневмоприводов и их элементов с применением микропроцессорных устройств и ЭВМ является одним из наиболее прогрессивных направлений дальнейшего развития этой сферы деятельности. При этом воспроизводятся требуемые по нагрузкам, скоростям, деформациям, температурам режимы. Выполняется объективное слежение за стабильностью режима и за процессом накопления повреждений в испытываемом устройстве. Происходит постоянная регистрация и заполнение параметров режима и характеристик состояния изделий и систем. Обеспечивается требуемая точность измерений, производится автоматическая корректировка их результатов с учетом погрешностей приборов и датчиков. ЭВМ дает команды на выключение испытательного стенда, когда повреждение достигло предельного значения. Статистическая обработка результатов испытаний и выдача протокола предусмотрены программным обеспечением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Исследования и испытания гидропневмосистем: электронный учебно-методический комплекс дисциплины для студентов спец. 1-36 01 07 "Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин" / Д. Л. Стасенко, Д. В. Лаевский. - Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015.
2. Исследования и испытания гидропневмосистем машин: Учебно-методическое пособие для вузов / Б.Ю. Желтовский, М.Г. Халамонский, В.С. Шевченко. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 204 с.
3. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Эксплуатация и надежность гидро- и пневмосистем: Учеб. пособие/ Н.В. Богдан, П.Н. Кишкевич, В.С. Шевченко; Под ред. Н.В. Богдана. - Мн.: Ураджай, 2001. – 396 с.: илл.
4. ГОСТ 20245-95 Гидроаппаратура. Правила приемки и методы испытаний
5. ГОСТ 14658 - 86 Насосы объемные гидроприводов
6. ГОСТ 22976-78 Правила приемки
7. ИСО 6403:19 88 «Гидропривод объемный - Гидроаппараты - Методы испытаний»
8. Измерение параметров и погрешности измерений - по ГОСТ 17108

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ РАБОЧИХ МАШИН**

**Учебно-методическое пособие  
для магистрантов специальности 1-36 80 02  
«Инновационные технологии в машиностроении»  
дневной и заочной форм обучения**

**Составитель Стасенко Дмитрий Леонидович**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 12.01.24.

Рег. № 64Е.  
<http://www.gstu.by>