

**ВОЕННО-МОРСКОЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ**

**В.Н.Темнов**

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ**

**Санкт-Петербург  
2006**

## Аннотация.

В монографии рассмотрены вопросы метрологического обеспечения сложных технических систем на примере корабельных энергетических установок. Показано, что любой объект измерения обладает специфическими метрологическими свойствами, которые необходимо учитывать при обосновании выбора контролируемых параметров и точности их измерения. Для выявления этих свойств и должно быть направлено метрологическое исследование объектов измерения. Рассмотрены задачи метрологического исследования, методы выбора контролируемых параметров и оценки допустимой точности их измерения для обеспечения требуемого качества и надежности функционирования сложных технических систем.

Книга может быть полезна научным работникам, инженерам и аспирантам, занимающимся вопросами метрологического обеспечения, а также слушателям и курсантам Военно-морских учебных заведений.

## ВВЕДЕНИЕ

По мере развития корабельных энергетических установок увеличиваются потребности в управлении сложными техническими процессами и в обслуживании технических средств. В задаче управления решающее значение имеет процедура контроля, целью которой является получение и анализ информации об управляемом объекте. От качества и количества анализируемой информации существенно зависит эффективность эксплуатации. Важной процедурой в задаче обслуживания является оценка технического состояния оборудования и поиск причин отказов и поломок.

На современных кораблях, как при управлении, так и в обслуживании все чаще используются физические процессы, за которыми невозможно следить непосредственно. Для наблюдения за ними необходимо, например, оценить уровень нейтронной мощности и радиации, определить электрические потенциалы и сопротивления, учитывать условия высоких давлений и температур рабочего тела. В любом случае для этого производятся измерения, представляющие собой процедуру нахождения физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств.

В процессе эксплуатации корабельных энергетических установок одновременно обрабатываются показания многих приборов для получения своевременной и достоверной информации и для принятия правильных решений и оценки их последствий. Особенно велика роль измерительной информации при управлении, где при относительно небольших затратах на измерения принимаются решения, связанные с большими материальными ценностями, с огромным риском обслуживающего персонала и с борьбой за живучесть технических средств и корабля в целом. В настоящее время наблюдение за состоянием энергооборудования осуществляется по сотням и тысячам

контрольно-измерительных приборов. Намечается дальнейшее совершенствование систем контроля, связанное с внедрением систем технического диагностирования. Однако рост и объем измерительной информации ограничен возможностями человека оператора по ее переработке для принятия правильных и своевременных решений. Указанное противоречие обостряет вечный вопрос, который возникает при постановке измерительного эксперимента: что и с какой точностью следует измерять. Без решения этого вопроса могут появиться информационно-измерительные системы, обладающие огромными возможностями по сбору и обработке информации, но малоэффективные по функциональному применению, если ее возможности не будут стыковаться с “потребностями” объекта.

# 1. КОРАБЕЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА КАК ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЯ.

## 1.1. Общая характеристика КЭУ.

Корабельная энергетическая установка предназначена для обеспечения движения корабля и снабжения энергией оружия, средств наблюдения и связи, а также механизмов, поддерживающих боеготовность в различных условиях плавания. Она состоит из совокупности технических средств и представляет собой сложную техническую систему, характерными особенностями которой являются:

- подчиненность единой цели;
- тесная взаимосвязь между составляющими ее элементами;
- воздействие на нее большого числа факторов, влияющих на ее функционирование;
- наличие как детерминированных, так и случайных процессов в общем рабочем процессе производства энергии;
- возможность изменения структуры технической системы в процессе эксплуатации.

Из назначения энергетической установки следует, что она вырабатывает различные виды энергии.

Механическая энергия необходима для вращения гребного винта, придающего кораблю поступательное движение. Для функционирования большого количества механизмов, комплексов, систем и устройств на корабле используется электрическая энергия. Плавание в различных широтах мирового океана требует расхода энергии на создание нормальных климатических условий в помещениях корабля. Последние достигаются за счет тепловой энергии, вырабатываемой установкой. В конечном счете, все виды энергии, необходимые для обеспечения нужд корабля, вырабатываются энергетической установкой.

кой путем использования энергии топлива, размещенного на корабле.

Таким образом, корабельная энергетическая установка это сложная техническая система, состоящая из совокупности механизмов, устройств и связей между ними, которая предназначена для выработки механической, электрической и тепловой энергий, необходимых для обеспечения боеготовности корабля.

В настоящее время на военных кораблях применяются энергетические установки, различающиеся по способу выработки энергии, типу главных двигателей, числу гребных винтов, способу передачи мощности на гребной винт, типу гребного винта, составу, устройству и принципу действия механизмов.

В зависимости от способа выработки энергии и типа главного двигателя, применяемого на корабле, получили распространение следующие типы энергетических установок:

- котлотурбинные энергетические установки (КТЭУ), в которых энергия первоначально вырабатывается в котлах, а затем преобразуется в механическую энергию в паровых турбинах;
- газотурбинные установки (ГТЭУ), в которых энергия первоначально вырабатывается в камерах сгорания и преобразуется в механическую энергию в газовых турбинах;
- дизельные энергетические установки (ДЭУ), где главным механизмом является двигатель внутреннего сгорания;
- ядерные энергетические установки (ЯЭУ), в которых энергия рабочего тела первоначально вырабатывается в ядерных реакторах и преобразуется в механическую энергию в паровых или газовых турбинах.

Кроме перечисленных выше типов КЭУ, нашли применение и различные комбинированные установки (КУ), такие как дизель-газотурбинные, парогазовые, дизель-электрические и т.д.

В составе энергетической установки выделяются следующие основные части: главная энергетическая установка, вспомогательная энергетическая установка, электроэнергети-

ческая система и общекорабельные механизмы, аппараты и системы. Каждая из составных частей установки в свою очередь включает в себя механизмы и аппараты, системы и устройства, комплексы и отдельные узлы, связанные между собой как по рабочему процессу, так и системами автоматического регулирования. Причем каждый элемент имеет определенное функциональное назначение.

Физические процессы, происходящие в отдельных элементах и в энергетической установке в целом, являются по преимуществу детерминированными. Детерминированность процессов обусловлена тем, что принцип действия механизмов и аппаратов, входящих в состав установки, основан на использовании определенных физических законов. Совокупность физических процессов в сложной системе обычно называют технологическим процессом. Для энергетических установок он характеризуется в основном односторонней направленностью. Направление движения энергетических и материальных потоков от одного элемента к другому определяется их назначением и взаимосвязью. Высокая связанность процессов приводит к тому, что изменение хода физического процесса в любом элементе установки, так или иначе, сказывается на течении всего технологического процесса в целом.

Взаимодействие рабочих процессов в энергетической установке способствует возможности развитию событий сразу в нескольких направлениях, увеличивая неопределенность различных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации, и затрудняя работу обслуживающего персонала при принятии решения. С другой стороны взаимодействие процессов обуславливает взаимосвязь параметров энергетической установки и обеспечивает поступление дополнительной информации к обслуживающему персоналу о качестве ее функционирования.

Режим работы энергетической установки, при котором существует равенство между притоком энергии или вещества к какому-либо ее элементу и расходом из него энергии или вещества является стационарным режимом. Однако в действительности каждое преобразование или передача энергии сопровождается ее аккумуляцией в соответствующем агрегате

или механизме. В том случае, если энергия передается вместе с энергоносителем, то аккумулируется также вещество энергоносителя. Тепловая энергия аккумулирована в пароводяной смеси котла, в металле трубопроводов и турбин и в движущемся в них рабочем теле. Механическая энергия аккумулирована во вращающихся массах роторов турбин, валов, винтов, исполнительных частей насосов. Масса рабочего тела аккумулирована в котлах, трубопроводах, в деаэраторе, в конденсаторах и т.д. Поэтому для энергетической установки корабля характерны динамические режимы, характеризующиеся большими скоростями изменения параметров. Кроме того, она постоянно подвержена воздействию внешних возмущений, которые нарушают равенства притоков и расходов энергии и вещества. Даже нормальный эксплуатационный режим работы энергетической установки при постоянной частоте вращения линии вала лишь условно можно считать установившимся из-за непрерывного чередования динамических процессов, которые затухают и возобновляются под влиянием различного рода мелких возмущений, неподдающихся прогнозированию.

Для компенсации возмущающих воздействий в корабельной энергетике широко применяются системы автоматического регулирования. Они облегчают деятельность обслуживающего персонала по управлению установкой, выполняя часть его функций. Внедрение систем автоматического управления уменьшает объем информации, анализируемой обслуживающим персоналом. Но увеличиваются вспомогательные функции системы управления. Они сами становятся объектом контроля, и для оценки качества их работы требуется анализ дополнительной информации.

Таким образом, энергетическая установка как объект измерения является сложной технической системой и обладает характерными для нее свойствами. К ним относятся:

- определенным целевым назначением - обеспечивать корабль различными видами энергии;
- сложной структурой, в которой каждый элемент выполняет определенную функцию;



- детерминированностью технологических процессов, происходящих в ней, благодаря которым случайные воздействия на объект измерения не имеют преобладающего характера;
- высокой динамикой физических процессов, способствующей возникновению больших скоростей изменения технологических параметров;
- глубокой взаимосвязью физических явлений, происходящих в установке.

Сложные технические системы, обладающие выше перечисленными свойствами, нуждаются в детальном анализе их как объектов измерения и обосновании их метрологического обеспечения.

## **1.2. Анализ систем контроля КЭУ.**

При анализе рабочих процессов КЭУ как сложной технической системы в общем плане выделяются три характерных компонента, которые участвуют в нем [1]. Первым главным компонентом является энергетическая установка, определенной конструкции, обеспечивающей выполнение ее целевого назначения. В качестве второго компонента выступает обслуживающий персонал, задачей которого является обработка информации о качестве ее функционирования для обеспечения боевой эффективности корабля. Наконец, третьим компонентом служит документация, регламентирующая процесс эксплуатации.

Взаимодействие всех трех компонент осуществляется на основе информационных связей. На рис 1.1 показаны потоки информации, связывающие рассматриваемые компоненты. Обслуживающий персонал получает измерительную информацию о внешней среде, функционировании и техническом состоянии, как объекта контроля, так и системы управления им. Принятие решений и выработка управляющих воздействий осуществляется на основе анализа измерительной информации и сравнения ее с регламентирующей информацией, заложенной в документации.

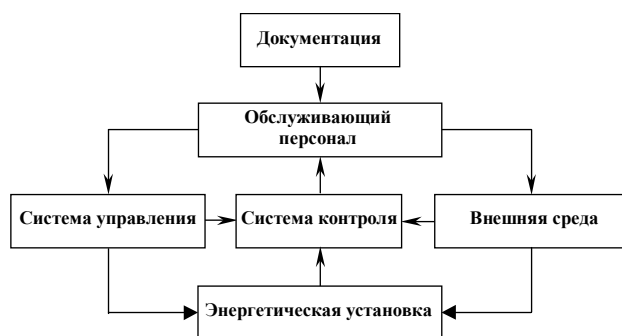


Рис. 1.1.

Взаимодействие технических средств и обслуживающего персонала обеспечивается корабельными системами управления и контроля. Помимо управляющих на них возлагаются информационные функции, объединяющие процессы сбора и обработки информации, регистрации событий и значений параметров, а также техническое диагностирование.

Информация о состоянии и функционировании корабельной энергетической установки выдается системой контроля, основной задачей которой является получение информации, необходимой для выработки воздействий на контролируемый объект с целью обеспечения максимального эффекта от использования его по назначению. Контроль служит для определения вида технического состояния оборудования, т.е. его исправности или неисправности, работоспособности или неработоспособности, правильного или неправильного функционирования.

Различают подсистемы оперативного, аварийного, диагностического и учетного контроля [1]. Подсистема оперативного контроля служит для получения информации, определяющей решения по регулированию технологического процесса. Аварийный контроль определяет управляющие воздействия защитного характера при наступлении опасных условий функционирования. Подсистема диагностического контроля служит для определения технического состояния оборудования и по-

иска причин возникновения неисправностей с целью определения мер по поддержанию заданного уровня работоспособности. Подсистема учетного контроля предназначена для сбора, регистрации и хранения информации.

Взаимодействие обслуживающего персонала с документацией необходимо для организации процесса контроля. Основными документами, регламентирующими контроль, является, как известно, эксплуатационные инструкции. Именно здесь должна находить отражение информация, предназначенная для выработки управляющих воздействий и процедур обслуживания. В большинстве инструкций приводятся сведения относительно значений контролируемых параметров, необходимой точности и периодичности контроля, области работоспособности изделия, простейших алгоритмов обработки информации. Но сопоставление требований инструкций с возможностями контрольно-измерительной аппаратуры показывает значительное несоответствие между ними.

Прежде всего, обращает на себя внимание то обстоятельство, что в ряде корабельных ЭУ примерно каждый пятый прибор обеспечивает наблюдение за параметрами, относительно которых в инструкциях нет никаких требований по контролю (что свидетельствует о низком качестве подобных инструкций по обслуживанию механизмов). Многие приборы оперативного контроля используются нерационально (50%), так как в инструкциях дается значение параметра на режиме, но не указывается необходимая точность контроля. Во многих случаях (30%) контрольно-измерительные приборы используются только для аварийного контроля (например, давление масла в системе смазки подшипников) в то время, как хорошо известно, что для этих целей более эффективной является аварийно-предупредительная сигнализация.

Общую характеристику систем контроля можно представить числом контролируемых параметров, точностью их измерения и скоростью изменения физических величин. В настоящее время контроль технического состояния энергетического оборудования осуществляется по сотням и тысячам контрольно-измерительным приборам. Например, состояние главной

энергетической установки корабля среднего водоизмещения наблюдается более чем по 700 параметрам. С применением в судовой и корабельной энергетике ядерных реакторов, промежуточного перегрева пара, газотурбинного наддува скорость процессов, протекающих в оборудовании установок, увеличилась более чем втрое. Допустимая погрешность измерения контролируемых параметров лежит в среднем в пределах 3-5%.

При проектировании новых кораблей производится дальнейшее совершенствование систем контроля, связанное с внедрением систем технического диагностирования. Они становятся частью комплексных систем управления. Учитывая, что трудозатраты на контроль в сферах управления и обслуживания соотносятся приблизительно как 1:3, можно ожидать, что объем информации, перерабатываемой обслуживающим персоналом, возрастет еще более значительно.

В современных системах управления энергетическими установками производится обобщение и сжатие информации, используются новые формы ее представления оператору с помощью дисплеев. потоки информации становятся очень большими, достигающими 250 бит/с. В тоже время максимальный поток информации, который способен пропустить человек-оператор, не превышает 10 бит/с. При этом наблюдается неравномерность в распределении информации между обслуживающим персоналом. Она лежит в пределах 2-40%.

Приведенные данные вызывают опасения, что в процессе эксплуатации могут возникнуть ситуации, когда обслуживающий персонал не в состоянии будет переработать всю поступающую информацию. Однако опыт использования существующих информационно-измерительных систем показывает, что оператор, основываясь на глубокой взаимосвязи параметров, пользуется информацией избирательно, поэтому в постах управления всегда находятся приборы, неиспользуемые оператором в процессе контроля.

Для контроля функционирования и технического состояния ЭУ обычно выделяются посты трех уровней:

- местные посты, из которых осуществляется локальное управление и контроль работы отдельного функционально-самостоятельного оборудования;
- посты дистанционного управления (ПДУ), представляющие собой групповые центры управления и контроля;
- центральный пост энергетики и живучести (ПЭЖ), в котором оператор контролирует работу и откуда руководит использованием всей энергетической установки корабля.

При нормальном использовании ЭУ управление функционированием одного эшелона обеспечивается путем контроля несколько сотен параметров. Несмотря на их большое количество, информации, поставляемой ими, как правило, недостаточно для полного представления о техническом состоянии и о рабочих процессах, протекающих в элементах ЭУ. Оценку полноты информации о функционировании и техническом состоянии технической системы можно произвести коэффициентом, которой представляет собой отношение

$$\pi = \frac{m}{l} \quad (1.1)$$

где  $l$  - количество параметров, необходимых для управления и обслуживания технической системы,  $m$  - количество контролируемых параметров.

Наибольшее число параметров (до 70%) измеряется в локальных системах контроля. На этом уровне наиболее полно и точно определяется перечень физических величин, характеризующих функционирование объектов контроля. Среднее значение коэффициента полноты контроля для основных элементов ЭУ на местных постах составляет  $\pi = 0,65 \div 0,8$ .

В центральных постах и постах дистанционного управления контролируется значительно меньшее число параметров (соответственно до 10% и 20%). С одной стороны это связано с чрезмерно большим числом параметров, характеризующих целую группу технических средств или даже подсистему ЭУ, например ГЭУ, ЭЭСК, ВЭУ. С другой стороны, задачи, решаемые здесь, требуют более обобщенную информацию, необходимую для управления функционированием и для оценки тех-

нического состояния установки в целом. Поэтому для эксплуатируемых кораблей коэффициент полноты контроля в этих постах значительно меньше, чем на местных постах и не превышают 0,1. Учитывая, что в центральных постах работают специалисты более высокой квалификации, в них начинают устанавливать системы централизованного контроля, обеспечивающие сбор, обработку, регистрацию и представление информации о всех технологических параметрах ЭУ.

При диагностировании полнота контроля может определяться как отношение вероятности выхода значений параметров за допустимые значения  $P(x > x_{пр})$  к вероятности отказа контролируемого оборудования  $P(Q)$ .

$$\pi = \frac{P(x > x_{пр})}{P(Q)} \quad (1.2)$$

$$\text{где: } P(x > x_{пр}) = 1 - \prod_{i=1}^n P(Q_i),$$

$P(Q_i)$  - вероятность нахождения  $i$ -того параметра в допуске.

При создании систем управления наблюдаются противоречия о достаточности численных значений полноты контроля. С точки зрения обеспеченности необходимой информацией следует стремиться к тому, чтобы коэффициент полноты контроля был близок к единице, а с эргономической точки зрения необходимо учитывать ограниченные способности человека-оператора. Поэтому выходом из этой ситуации является тщательное обоснование выбора контролируемых параметров.

Анализ вида контролируемых величин показывает, что чаще всего измеряются давления и разряжения (50%), электрические величины (20%), температуры (18%) и уровни (8%). Измерение линейных перемещений, частоты вращения, расходов, химического состава рабочего тела производится реже и составляет (2÷4)% на каждую из перечисленных физических величин. Для обеспечения живучести и надежности энергетической установки параметры, выход которых за предельные значения приводит к наиболее тяжелым последствиям для всей

установки, контролируются с дублированием на различных уровнях (местный пост – ПДУ). Наибольший процент дублирования имеет параметр “частота вращения” – 75% от общего числа измерений этого параметра. Как недостаток систем контроля следует отметить, что оценка каких-либо обобщенных показателей, характеризующих технологический процесс или оборудование в целом, на кораблях практически не осуществляется.

Погрешность измерения параметров определяется классом точности приборов, используемых в системах контроля. Из общего количества средств измерения (СИ) большая часть принадлежит к классу точности 2.5 (70%). Наиболее часто такие приборы применены на местных постах. В ЦПУ чаще других применяются средства измерения класса 1.5. В существующих системах контроля класс точности часто определяется видом контролируемых величин. С наибольшей точностью контролируется расход и угловая скорость (частота вращения) – приборами классов 1.0 и 1.5. Обоснование необходимой точности, как правило, отсутствует.

Для надежной эксплуатации корабельных технических средств необходимо не допускать попадания значений параметров в области, опасные для функционирования. Для предупреждения оператора о приближении режима работы оборудования к предельному состоянию служат предельно-допустимые значения параметров. Они указываются в инструкциях по эксплуатации, а на шкалах приборов они отмечаются либо красной чертой, либо стрелками (установками). Как правило, эти значения принимаются с некоторым запасом по отношению к номинальным значениям. Значения запаса для параметров различного вида в процентном отношении показаны в таблице 1.1.

В среднем значения установки отличаются от номинального значения на (28-30)%. Но обращают на себя внимание разные значения запаса для параметров различного вида. В эксплуатируемых энергетических установках установки определены для 60% параметров.

Таблица 1.1

	Давле- ние	Темпе- ратура	Частота враще- ния	Линейное положе- ние	Уровень
Запас для предельно-допустимого значения.	9,04%	19,15%	18,22%	9,05%	34,02%
Использование предупредит. сигнализации в процентах к общему числу параметров.	7,69%	72,58%	22,22%	-	66,67%

Эффективность контроля наиболее динамично изменяющихся параметров, изменения которых оказывает сильное влияние на надежность установки, повышена за счет применения предупредительной сигнализации. Средства предупредительной сигнализации дублируют показания КИП как в постах одного уровня, так и на различных уровнях контроля. Применение предупредительной сигнализации по видам параметров крайне неравномерно (табл. 1.1). В целом она использована для (30÷35)% от общего количества параметров.

Аварийная сигнализация используется для информирования операторов о срабатывании защитных устройств из-за наступления угрозы выхода из строя технических средств.

Таким образом, существующие системы контроля ЭУ представляют собой сложную, иерархическую структуру. Операторам представляется обильная высокоточная информация о функционировании механизмов, систем и устройств энергетической установки, выделены наиболее важные параметры основного оборудования, обеспечено дублирование контроля параметров. Сформированы центральные посты для групповых и комплексных систем контроля. Однако отсутствие обоснований по выбору состава контролируемых параметров, по требуемой точности измерений и по допустимым отклонениям от номинальных значений приводит к тому, что существующие



системы контроля не удовлетворяют современным метрологическим требованиям.

### **1.3. Требования к метрологическому обеспечению корабельных энергетических установок.**

#### **1.3.1. Задачи метрологического обеспечения.**

Комплексная автоматизация корабельной энергетики привела к коренной перестройке измерительной техники. В ее задачу наряду с измерением входит также автоматический сбор, доставка, запоминание, регистрация, отображение, обработка и анализ информации, полученной в результате измерений. Основой измерительной техники становится не отдельный прибор, а информационно-измерительная система, которая и решает поставленные задачи. Она обеспечивает:

- контроль функционирования энергетической установки в целом с целью согласования отдельных процессов и достижения максимальной эффективности ее использования;
- контроль протекания отдельных физических процессов и поддержания их на требуемом уровне;
- обобщение результатов наблюдения за функционированием технических средств (техническая диагностика, прогнозирование, предсказание и ликвидация аварийных ситуаций);
- представление результатов контроля и анализа информации оператору.

Потребности в средствах измерения, контроля и диагностики возрастают в настоящее время ежегодно от 10 до 25 %. Так, например, в 1985 году на мировом рынке было продано датчиков на сумму около 1,2 миллиарда долларов, в 1990 году – на 3 миллиарда долларов, в 1998 году – на 27,6 миллиардов долларов, в 2002 году – на 35,9 миллиардов долларов.

Основными причинами возрастания роли измерений в обеспечении эксплуатации энергоустановок и в поддержании их боеготовности являются:

- четко выраженной тенденции усложнения корабельных технических средств;
- полная или частичная автоматизация технологических процессов при значительном сокращении непосредственного участия человека-оператора в управлении;
- существенное повышение ответственности за правильное принятие решений;
- повышение требований к эффективности эксплуатации энергоустановок и ее составляющим: экономичности, надежности, живучести и др.

С возрастанием роли измерений при эксплуатации корабельной энергетики повышаются требования к метрологическому обеспечению энергетического оборудования. Целевая установка современных требований направлена

- на обеспечение требуемого качества оборудования при его создании, эксплуатации и ремонте;
- на повышение эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, процессов производства и испытаний оборудования;
- на поддержание готовности к применению и на обеспечение эффективности эксплуатации оборудования.

Метрологическое обеспечение корабельных технических средств представляет собой комплекс научных и организационно-технических мероприятий, направленных на выполнение точных и своевременных измерений, соблюдение единства, требуемой точности измерений и повышение достоверности контроля параметров в целях поддержания энергетического оборудования в постоянной готовности к действию. Он предполагает выполнение следующих основных мероприятий:

- разработку и включение в ТТЗ требований к метрологическому обеспечению для вновь разрабатываемого оборудования;
- военно-метрологическое сопровождение разработок нового оборудования;
- формирование парка средств измерений, разработку требований к ним;

- установление единой номенклатуры средств измерений, допущенных к применению в ВМФ;
- эксплуатацию корабельных средств измерений, включающую в себя применение, метрологическую аттестацию и поверку, ремонт и хранение с высокой эффективностью;
- обеспечение единства и точности измерений для получения достоверного результата.

Эти мероприятия выполняются для решения следующих задач метрологического обеспечения [2]:

- определение основных направлений его развития и путей наиболее эффективного использования научных и технических достижений в метрологии и измерительной технике;
- разработка научно-методических, технико-экономических, правовых и организационных основ;
- обеспечение единства измерений, установление допускаемых к измерению физических величин;
- стандартизация правил и положений в области метрологического обеспечения разработки, производства и эксплуатации образцов техники;
- определение рациональной номенклатуры измеряемых параметров, допустимых пределов их изменений и норм точности измерений;
- установление единых методов, с помощью которых обеспечивается передача размеров единиц физических величин от эталонов и образцовых средств измерений к рабочим средствам измерений;
- определение номенклатуры технических средств метрологического обеспечения (эталонов, средств измерений и измерительного контроля, стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов), их создание, хранение и эксплуатация;
- установление требований и нормирование метрологических характеристик средств измерений и измерительного контроля, применяемых при создании и эксплуатации технических средств;
- обеспечение разрабатывающих, выпускающих и эксплуатирующих организаций рабочими эталонами, рабочими и

образцовыми средствами измерений;

– осуществление надзора за производством, состоянием, применением, ремонтом средств измерений;

– проведение анализа состояния метрологического обеспечения с применением количественных критериев оценки эффективности мероприятий по совершенствованию измерений и оптимизации образцовых и рабочих средств измерений.

Перечисленные задачи решаются руководящими органами метрологической службы страны, разработчиками оборудования, контролирующими органами ведомств, метрологами предприятий и эксплуатационниками.

Заключительным мероприятием метрологического обеспечения в соответствии с Законом РФ “О единстве измерений” является метрологическая экспертиза образцов вооружения и военной техники, во время которой проверяется обоснованность всех принятых решений по метрологическому обеспечению.

### **1.3.2. Количественные показатели метрологического обеспечения.**

Эффективность метрологического обеспечения технических средств закладывается на стадии их разработки (проектирования) и зависит от совместных усилий разработчиков, изготовителей и пользователей измерительных систем и соответствующих метрологических служб. Ее целесообразно анализировать применительно к эксплуатации технических средств, а при модернизации и совершенствовании информационно-измерительных систем – на стадиях разработки.

Основным мотивом выбора показателя эффективности того или иного оборудования является строгое соответствие цели, которая может быть достигнута в результате его применения. Иными словами, показатель эффективности должен быть мерой достижения цели, мерой успешности выполнения задачи. Показатели качества метрологического обеспечения должны характеризовать приращение эффективности технических средств за счет качества измерений в процессе эксплуата-

ции. При неправильном решении задач метрологического обеспечения это приращение может быть и отрицательным.

В целом показатель эффективности должен удовлетворять следующим основным требованиям [2]:

- представительности, т.е. способности обеспечивать оценку основных задач, решаемых объектом измерения;
- эффективности в статистическом смысле, т. е. обладать относительно небольшой дисперсией;
- чувствительности по отношению к тем показателям, на улучшение которых направлено совершенствование метрологического обеспечения;
- простоте, физическому смыслу и возможности определяться без больших затрат и потерь времени.

Эффективность метрологического обеспечения может оцениваться комплексными и частными показателями. В зависимости от задач, решаемых технической системой, частными показателями эффективности могут служить стоимость информационно-измерительной системы, суммарная погрешность измерений каждого из измеряемых параметров, достоверность получаемой информации, время приготовления к действию и т.п. Частные показатели могут сворачиваться в комплексные показатели эффективности [2].

В последнее время часто в качестве показателей эффективности используют стоимостные показатели. Для военных изделий сложно определить соотношение между предполагаемой стоимостью и ее эффективностью. Вследствие этого для военной техники в качестве основного критерия используются чаще всего частный или комплексный показатель эффективности, а стоимость рассматривают как дополнительный фактор в виде ограничений (см. п. 6).

При оценке эффективности метрологического обеспечения при эксплуатации энергетических установок кораблей ВМФ следует принимать во внимание двойственный характер влияния измерений на боеготовность. С одной стороны, результаты измерений позволяют достоверно оценить уровень тактико-технических характеристик и на этой основе принять правильные решения о готовности технических средств к при-

менению и о наиболее благоприятном режиме их использования. С другой стороны, необходимость в измерении большого числа параметров приводит к тому, что в настоящее время от 40 до 90% времени, отводимого на подготовку технических средств к использованию, тратится на измерения. Так, например, время, затрачиваемое на подготовку ядерной энергетической установки к действию, составляет 2-4 часа.

В общем, плане эффективность метрологического обеспечения – это оценка дополнительной отдачи управляемого объекта за счет использования средств измерения. Дополнительная отдача получается при выполнении комплексной системой управления, как управляющей, так и информационной функций. Для увеличения отдачи управляемого объекта за счет информационной функции должна поставляться необходимая по виду и достаточная по количеству информация. Отсюда эффективность метрологического обеспечения – это дополнительная отдача объекта за счет повышения точности измерения и достоверности информации.

Поэтому в наиболее общем случае показатель эффективности метрологического обеспечения для вооружения и военной техники любого типа должен представлять собой относительное приращение

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{мо}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{ВВТ}} / \mathcal{E}_{\text{ВВТ}}$$

где:  $\Delta \mathcal{E}_{\text{ВВТ}}$  - приращение частного или комплексного показателя эффективности ВВТ за счет метрологического обеспечения;

$\mathcal{E}_{\text{ВВТ}}$  - значение показателя эффективности прототипа ВВТ до совершенствования метрологического обеспечения.

Заметим, что при оценке эффективности метрологического обеспечения следует иметь в виду, что современные информационно-измерительные системы являются многофункциональными. Они предназначаются не только для измерения, но и выполняют функции измерительного контроля, диагностирования и прогнозирования. Кроме того, современные (и в еще большей степени перспективные) информационно-измерительные системы имеют в своем составе ЭВМ, обеспечивающие переработку измерительной информации. Поэтому

оценка эффективности метрологического обеспечения является сложной технической задачей.

В большинстве случаев непосредственное определение зависимости комплексного показателя от параметров метрологического обеспечения практически невозможно, и поэтому используют принцип декомпозиции (разукрупнения) задачи [2]. При декомпозиции на основе описательного изложения содержания метрологического обеспечения, выделяют этапы и устанавливают частные показатели, от которых зависит качество измерений. Затем путем построения общей модели метрологического обеспечения определяют зависимость комплексного показателя от частных показателей. Использование частных показателей целесообразно и в том случае, когда на изменение его значения оказывает влияние конкретный метод, используемый для совершенствования метрологического обеспечения.

В настоящее время при проектировании образцов вооружения и военной техники выдвигаются требования к значениям частных показателей, характеризующих качество метрологического обеспечения [76]. При этом основными показателями, характеризующими те или иные стороны метрологического обеспечения, являются:

- предел допускаемой суммарной погрешности измерения для каждого измерения;
- полнота контроля;
- достоверность информации, полученной при измерениях;
- условные вероятности ложного и необнаруженного отказов;
- вероятность правильного обнаружения отказавшего элемента;
- продолжительность и трудоемкость измерений;
- стоимость метрологического обеспечения;
- масса и объем дополнительного оборудования.

Способы расчета частных показателей метрологического обеспечения приводятся в нормативной документации, в науч-

но-технической литературе [2, 74, 75, 76] и в предлагаемой работе.

### **1.3.3. Основные направления метрологического обеспечения.**

Для повышения эффективности метрологического обеспечения необходимо совершенствовать все его стороны. Различают следующие основные направления совершенствования метрологического обеспечения: научное, организационное, техническое и нормативно-методическое.

Научной основой метрологического обеспечения является метрология – наука об измерениях, методах и средствах их осуществления. Основными задачами для нее являются разработка общей теории измерений, установление единиц физических величин, создание методов и средств измерений, способов передачи размеров единиц физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений, основ обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений. Метрология обобщает практический опыт, создает и совершенствует теоретические основы измерений и определяет направления развития измерительной техники. Одной из основных задач, которую метрология решает в военном деле, является метрологическое обеспечение разработки, производства и эксплуатации образцов военной техники вооружения.

Организационной основой метрологического обеспечения является сеть государственной и ведомственных метрологических служб, научных и производственных организаций и предприятий, деятельность которых обеспечивает единство и требуемую точность измерений. К ней следует отнести и систему подготовки метрологов.

С целью планирования мероприятий, обеспечивающих единство измерений, требуемое качество изделия, точность измерения и достоверность контроля характеристик оборудования и его технического состояния, разрабатывается программа метрологического и диагностического обеспечения. Она является обязательным документом и разрабатывается го-



ловным исполнителем опытно-конструкторских работ перед их началом. В ней необходимо учитывать:

- Состав и заданный уровень требований.
- Степень сложности оборудования и принципы его действия.
- Стоимость оборудования и планируемых работ по метрологическому обеспечению.
- Условия эксплуатации и особенности использования оборудования.

В программе необходимо предусмотреть

- Перечень мероприятий по метрологическому обеспечению.
- Исполнителей и сроки выполнения этапов.
- Нормативно-технические и методические документы.

Исполнителями мероприятий по метрологическому обеспечению целесообразно назначать не только специалистов по метрологии, но и разработчиков оборудования.

Наиболее существенной стороной метрологического обеспечения является материальное, в данном случае, техническое направление его совершенствования. Оно включает в себя разработку технических средств: эталонов, образцовых средств измерений и поверочных установок, рабочих мер и измерительных приборов, систем контроля и диагностики, стандартных образцов веществ и материалов. Кроме того, оно включает в себя мероприятия по достижению и поддержанию необходимого качества вышеперечисленных средств.

Нормативно-методическое направление метрологического обеспечения предполагает создание законодательных нормативно-технических и методических документов, регламентирующих его организацию, методы и средства. К ним относят государственные стандарты, методические указания, руководства, положения, инструкции и т. п., которые базируются на результатах исследований, опыте эксплуатации, на передовом опыте метрологического обеспечения. Они регламентируют деятельность метрологической службы, порядок и правила измерений параметров технических средств, поверки и ремонта

средств измерений и другие вопросы. Качество этих документов во многом определяет правильность и эффективность работ по метрологическому обеспечению.

Качественная обработка документов по метрологическому обеспечению предполагает регламентирование прогрессивных правил, норм метрологического обеспечения, позволяющих достичь максимально возможной боевой готовности военной техники и вооружения ВМФ.

Все работы, направленные на метрологическое обеспечение, имеют две стороны. С одной стороны, они должны способствовать получению обслуживающим персоналом измерительной информации, необходимой для использования объекта по назначению. С другой стороны, они служат для обеспечения необходимого качества измерительной информации. В первом случае необходимо обосновать выбор измеряемых параметров, установить допуски и требуемую точность измерений, обслуживающим персоналом, спланировать процедуру измерения. Во втором случае, необходимо выбрать средства измерения, обеспечить единство, точность, полноту и своевременность измерений. Отсюда научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, устремленные на совершенствование метрологического обеспечения образцов ВВТ должны проводиться в двух направлениях:

- метрологическое исследование оборудования как объектов измерения;
- обеспечение эффективности и единства измерений при его эксплуатации.

#### **1.3.4. Задачи метрологического исследования корабельных технических средств.**

Для обеспечения высокой эффективности и боевой готовности энергетического оборудования первостепенная роль принадлежит достоверным измерениям технических параметров, формирующих исходную информацию для принятия решений. Без необходимой измерительной информации нельзя принять качественные и высокоэффективные решения. Поэто-

му метрологическое обеспечение корабельных технических средств должно, прежде всего, способствовать ответу на главные вопросы: какие параметры и с какой точностью необходимо измерять в процессе эксплуатации.

Ответы на эти вопросы даются в ходе метрологического исследования объектов измерения. Оно должно быть направлено на достижение требуемых метрологических характеристик разрабатываемых изделий путем [65]:

- научно обоснованного выбора методов измерений;
- проведения экспериментальных исследований для оценки статистических характеристик параметров;
- выявления предельного состояния объекта измерения;
- разработки математической модели объекта измерения;
- выявления условий проведения измерений;
- разработки алгоритмов обобщения измерительной информации;
- оценки эффективности направлений по совершенствованию метрологического обеспечения.

Основными задачами метрологического исследования являются обоснование основополагающих положений метрологического обеспечения:

- выбора параметров технических средств, подлежащих измерениям или измерительному контролю при испытаниях, производстве и использовании по назначению;
- назначения требуемой точности их измерения;
- выявления допустимых отклонений на каждый из контролируемых параметров.

От решения этих задач зависит достоверность и качество информации о функционировании объектов измерения, обеспечение контролепригодности изделий на этапе их проектирования и производства, выбор методов и средств измерения. Результаты исследования должны использоваться как при проектировании информационно-измерительных систем, так и при написании эксплуатационных инструкций.

Метрологическое исследование производится силами предприятия – разработчика оборудования с привлечением

метрологической службы предприятия. Эти организации обладают полными знаниями об объекте измерения.

Метрологическое исследование включает в себя разработку следующих направлений:

- оптимизацию числа и вида параметров, необходимых для контроля и диагностирования типового корабельного оборудования;
- оценку области изменения значений параметров исходя из заданной эффективности функционирования корабельной энергетической установки;
- формирование потоков обобщенной информации, поступающей в ЦПУ;
- создание алгоритмов по переработке исходной информации.

В настоящее время уже разработан ряд способов, решающих отдельные вопросы выбора необходимого объема информации, как для управления, так и для обслуживания ЭУ. Однако для создания сложных и дорогостоящих постов необходимо решение проблемы в полном объеме. Рассмотрим круг задач, стоящих перед каждым направлением.

Основной задачей первого направления является выбор параметров, характеризующих состояние корабельного оборудования. В опубликованных работах он осуществляется чаще всего либо путем ранжирования параметров в порядке убывания их важности (исключения из сферы контроля наименее значимых), либо с помощью исключения из сферы контроля взаимосвязанных параметров. Оба способа обеспечивают уменьшение количества контролируемых параметров.

Состав контролируемых параметров нельзя ограничивать лишь сведениями о главном двигателе. Обоснованию подлежат также параметры вспомогательного оборудования.

Параметры, традиционно применяемые для контроля ее функционирования, всегда использовались обслуживающим персоналом для поиска места отказа и устранения причин его появления. Однако опыт эксплуатации показывает, что информации, получаемой в результате наблюдений за этими параметрами, оказывается недостаточно для целей диагностирова-

ния. Причиной этого является необходимость более глубоких сведений о состоянии оборудования для целей диагностирования.

Кроме того, существует принципиальное различие в оценке значимости параметров функционирования и технического состояния. Для контроля функционирования важность определяется такими свойствами параметра, как его информативность и зависимость от показателей эффективности. Для диагностирования особенно важными являются те параметры, которые дают наиболее полную информацию о появлении неисправностей. С увеличением надежности энергетического оборудования потребность в контроле диагностического параметра уменьшается, в то время как важность параметра функционирования может остаться без изменения. Тем не менее, и те, и другие параметры могут использоваться как для традиционного контроля, так и для диагностирования, поэтому их разделение можно считать условным. Но, несмотря на это, его следует производить, определяя степень использования параметров в процессах контроля и диагностирования.

Таким образом, задачами первого направления можно считать:

- выбор состава контролируемых параметров на всех уровнях управления;
- определение состава параметров типового энергетического оборудования;
- разделение выбранного состава параметров технического средства на контролируемые и диагностические величины.

Область изменения значений параметров оказывает существенное влияние на объем информации, поступающей к обслуживающему персоналу. Методы, направленные на её определение, относятся ко второму направлению. С увеличением точности измерения растет количество информации. Следовательно, для проектирования систем контроля и технического диагностирования необходимо исследование допустимого диапазона изменения значений параметров.

В процессах управления встречаются два основных вида контроля: оперативный и аварийный. В задачу оперативного контроля входит получение информации, необходимой для поддержания на определенном уровне параметров ЭУ с помощью управляющих воздействий регулирующего характера. Точность поддержания значений параметров зависит от требований, предъявляемых к обобщенным показателям работы, условий качественного проведения технологического процесса, ограничений по стоимостным и массогабаритным характеристикам и пр. Отсюда, для оперативного контроля главной задачей является назначение требуемой точности измерения, т.е. оценка допустимой погрешности измерения.

В задачу аварийного контроля входит получение информации, необходимой для определения состояния ЭУ или ее элемента, требующего управляющих воздействий защитного характера. Сигналом для этого служит превышение параметром некоторого допустимого предела (допуска). При оценке его значения необходимо обосновать тот предел отклонения параметра, при переходе за который наступает предельное состояние оборудования. То же самое можно сказать и в отношении диагностирования, в задачу которого входит определение степени работоспособности изделия. В том и в другом случае речь идет об исследовании области работоспособности изделия. Последнюю можно определить как область изменения параметров, ограниченную предельными значениями. В ней изделие является работоспособным и не достигает своего предельного состояния.

В тесной связи с оценкой области изменения значений параметров находится определение периодичности контроля и диагностирования. На периодичность получения информации решающее влияние оказывает скорость протекания процессов в оборудовании установки, которая лежит в широких пределах от 0,01 до 60%/с. Определение оптимальной периодичности зависит от соотношения ширины области работоспособности и скорости изменения параметра.

Таким образом, для определения области изменений параметров необходимо:

- оценить допустимую погрешность измерения параметров оперативного контроля;
- определить границы области работоспособности для параметров аварийного контроля и диагностирования;
- установить допустимую периодичность измерения.

Решение сформулированных выше задач направлено на получение необходимого и достаточного объема информации о функционировании и состоянии технических средств, входящих в состав корабельной ЭУ.

Третье направление предполагает формирование потоков информации, поступающих в посты управления. В связи с тем, что энергетическая установка является сложной технической системой, простое суммирование параметров (характеризующих ее оборудование) для вывода в пост управления нельзя считать целесообразным, по крайней мере, по двум причинам:

- для характеристики сложной системы свойственны свои специфические показатели;
- взаимосвязь элементов позволяет исключить из сферы контроля целый ряд параметров.

Отсюда, двумя задачами, направленными на выделение параметров, контролируемых в посту управления, является:

первая – определение состава комплексных показателей, характеризующих установку в целом;

вторая – исключение дублирующих друг друга параметров.

Решение этих задач во многом зависит от типа энергетической установки. Тем не менее, следует ожидать, что резкого сокращения количества точек контроля не произойдет. Поэтому сбор и первичная обработка больших объемов информации в настоящее время осуществляется с помощью систем централизованного контроля или с применением ЭВМ.

Следующие задачи по формированию потоков информации, поступающей в пост управления, вытекают из рассмотрения корабельной энергетической установки с позиций сложной технической системы.

Кроме комплексных показателей, характерным для сложной системы является наличие в ней определенной струк-

туры. Изменение состава действующих технических средств чаще всего вызывается необходимостью обеспечения заданного режима работы или поддержания требуемой надежности включением резервного оборудования. Из-за этого энергетическую установку следует отнести к системам с переменной структурой. Обслуживающий персонал должен быть обеспечен информацией об изменениях в структуре системы и о состоянии ее элементов. Опыт эксплуатации показывает, что изменения в структуре хорошо отражаются с помощью мнемосхем, которыми обычно оснащаются посты управления.

В пост управления, как правило, выводится информация, характеризующая сложную техническую систему в целом. Информация о состоянии и функционировании отдельных ее элементов уделяется меньше внимания. Тем не менее, любой элемент выполняет вполне определенную функцию в сложной системе. Для оборудования, влияющего на эффективность всей технической системы, всегда можно выделить один или несколько выходных параметров. Они являются источниками информации, необходимой для выработки решений по управлению всей сложной системы в целом. Такие параметры целесообразно назвать системными и контролировать в постах управления.

При эксплуатации установки могут возникнуть ситуации, когда возможности по ее управлению ограничены двумя тремя управляющими воздействиями. В этом случае эффективным способом получения информации о состоянии сложной системы является ситуационный контроль, сущность которого заключается в том, что в пост поступает обобщенная информация о возникшей в системе ситуации, например, в виде совета обслуживающему персоналу.

На основании сказанного выше можно перечислить следующие задачи по формированию потоков информации, поступающих в ЦПУ:

- выбор обобщенных показателей функционирования и состояния энергетической установки;
- обоснование объема информации об изменениях в составе действующих технических средств;



- внедрение ситуационного контроля;
- выделение системных параметров оборудования, влияющего на эффективность всей установки;
- выбор параметров для контроля с помощью средств централизованного контроля.

Четвертое направление связано с созданием алгоритмов по переработке информации. Применение ЭВМ в составе комплексных систем управления позволяет производить обобщение и сжатие информации, поступающей в пост управления, организовать обработку и представление информации оператору в соответствии с рассмотренным выше кругом задач, обеспечивает регистрацию параметров для ведения учетного контроля. Кроме того, без них невозможно создание систем технического диагностирования и прогнозирования состояния основного оборудования.

Для использования возможностей ЭВМ в настоящее время частично уже созданы алгоритмы по переработке исходной информации для отдельных видов оборудования. Анализ содержания алгоритмов показывает, что, по крайней мере, для основного оборудования они должны решать следующий круг задач:

- расчеты обобщенных показателей;
- анализ диагностических моделей;
- прогнозирование, поиск и обнаружение причин отказов;
- обработка информации для ведения ситуационного контроля.

Рассмотренные выше направления метрологического исследования охватывают основной круг вопросов, касающихся решения главных задач метрологического обеспечения, конечной целью которых является повышение эффективности корабельных энергетических установок.

### **1.3.5. Обеспечение единства и точности измерений при эксплуатации корабельных технических средств.**

В процессе использования измерительной техники необходимо обеспечить такое состояние измерений, чтобы обслуживающий персонал получал требуемый объем информации в течение всего периода эксплуатации корабельной энергетической установки. Для достижения этой цели решаются следующие задачи метрологического обеспечения [2]:

- обеспечение единства измерений, установление допусков к применению физических величин;
- использование единых методов, с помощью которых обеспечивается передача размеров единиц физических величин от эталонов и образцовых средств измерений к рабочим средствам измерений;
- правильное хранение и эксплуатация средств метрологического обеспечения: эталонов, средств измерений и измерительного контроля, стандартных образцов, состава и свойств веществ и материалов;
- обеспечение нормативных метрологических характеристик средств измерений и измерительного контроля в течение всего периода эксплуатации технических средств;
- осуществление надзора за состоянием, применением, ремонтом средств измерений;
- проведение анализа состояния метрологического обеспечения с применением количественных критериев оценки эффективности мероприятий по совершенствованию измерений и оптимизации образцовых и рабочих средств измерений;
- проведение метрологической экспертизы образцов и комплексов оборудования.

При решении этих задач особого внимания требуют мероприятия, направленные на обеспечение единства и точности измерений:

- формирование парка средств измерений, разработку требований к ним;

– установление единой номенклатуры средств измерений, допущенных к применению в ВМФ;

– - эксплуатацию корабельных средств измерений, включающую в себя применение, метрологическую аттестацию и поверку, ремонт и хранение с высокой эффективностью;

– обеспечение достоверной информацией обслуживающего персонала на всех этапах использования оборудования.

Обеспечение единства и точности измерений достигается при следующих условиях:

– использование международной системы единиц физических величин;

– поверкой средств измерения;

– обеспечением метрологической надежности средств измерений.

Для обеспечения первого условия в нашей стране с 1 января 1980 года принят стандарт, обязывающий применять международную систему единиц. В конструкторских и научных разработках требования стандарта соблюдаются, на производствах и эксплуатируемой технике – не всегда. Более того, зачастую наблюдается формальный перевод единиц из одной системы в другую, который приводит к появлению систематических погрешностей. Они могут иметь даже мультипликативный характер. Например, формальный перевод единиц измерения давления  $\text{кг/см}^2$  в МПа приводит к появлению мультипликативной погрешности, характеризуемой множественным коэффициентом 1,02.

Наиболее трудоемким условием обеспечения единства и точности измерений является поверка средств измерений. Во время поверки производится установление органом государственной метрологической службы (или другим официально уполномоченным органом, организацией) пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям.

Для кораблей и судов ВМФ это мероприятие метрологического обеспечения организационно осуществляется следующими способами:

- средства измерения демонтируются с технических средств, доставляются в ЛИТ, проходят поверку. В том случае, если средства измерения признаны годными к применению по метрологическим характеристикам, они возвращаются на корабль и устанавливаются на свое место;

- при прохождении кораблем ремонта измерительная техника ремонтируется в специальных цехах на судоремонтных заводах;

- совместно с представителями лаборатории измерительной техники (ЛИТ) проводится поверка средств измерения выездными группами на борту корабля специальным образцовым оборудованием.

Общие требования к поверке средств измерения определяются приказом ГК ВМФ № 322 от 6.09.97 г. “О введении в действие перечня СИ, подлежащих периодической поверке в ВМФ”. В основном они сводятся к следующему.

СИ общего назначения подлежат поверке в сроки определенные для аналогичных типов (групп) приборов.

Специальные СИ, не входящие в настоящий перечень, подлежат поверке в сроки в соответствии с требованиями их эксплуатационной документации. К ним относятся приборы для измерения состава воздуха, наличия в нем водорода, кислорода, СО и СО<sub>2</sub>; приборы, обслуживающие газосварочную аппаратуру; приборы, установленные на объектах Гостехнадзора и водолазном снаряжении.

В зависимости от назначения СИ и условий их эксплуатации командиры воинских частей могут в обоснованных случаях по согласованию с метрологическими службами объединений устанавливать иную периодичность поверки СИ, но не реже указанной в приказе ГК ВМФ № 322-97 г. (например, в период подготовки корабля к длительному плаванию).

Периодичность поверки рабочих макетов и поверочного оборудования метрологических частей определяется перечнем, разрабатываемым метрологической службой ВС РФ.

Средства измерения, установленные на комплексных системах управления ракетных комплексов, паропроизводящих установках кораблей с ЯЭУ и других системах непрерывного действия, допускается проверять с периодичностью, отличной от указанной в приказе ГК ВМФ № 322-97г. В этом случае проверка совмещается с проведением технического обслуживания или ремонта комплексной системы. Сроки проверки устанавливаются органами метрологической службы ВМФ.

Проверка средств измерения, находящихся на длительном хранении на складах и базах, не проводится. Они проверяются только перед закладкой и перед выдачей технических средств в эксплуатацию (или при переконсервации).

Средства измерения, применяемые для установления факта наличия (изменения) физической величины без количественной оценки этой величины, относят к категории индикаторных и проверке не подвергаются. На лицевой панели индикаторного прибора наносится знак “И”. Порядок списания таких приборов разрабатывается флагманскими специалистами соединений и утверждается командирами соединений.

Средства измерения, применяемые для учебных целей (демонстрационные), периодической проверке не подвергаются. На их лицевой панели наносится обозначение “У” (учебный). Для других целей эти средства измерений применять запрещено. Право относить средства измерения к учебным и утверждать списки имеют право начальники ВВУЗов и командиры военных частей.

Проверка СИ на строящихся и ремонтирующихся кораблях и судах ВМФ производится согласно совместным решениям ВМФ и МСП.

В настоящее время преобладающими являются первые два способа проверки. Они имеют два очень существенных недостатка:

- являются очень трудоемкими;
- на время проверки существенно уменьшают готовность корабля к выходу в море.

Эти недостатки отсутствуют при третьем способе организации проверки, которая происходит непосредственно на ко-

рабле. В настоящее время известны методы, позволяющие определять пригодность средств измерения без демонтажа оборудования. Основными из них являются:

- использование тестов для проверки работоспособности измерительных каналов в алгоритмах информационно-измерительных систем;
- внедрение переносных образцовых средств измерения;
- использование взаимосвязей между параметрами и др.

Однако здесь возникают трудности юридического характера. Подобное определение пригодности средств измерения в корабельных условиях уже не является проверкой в том понимании, как это предусматривается нормативными документами. Выходом из этого положения является повышение метрологической надежности средств измерения.

Метрологической надежностью называется свойство средства измерения сохранять свои точностные характеристики в течение требуемого срока. Ее контроль осуществляется при очередной проверке средства измерения. Из определения метрологической надежности следует, что от нее зависят сроки межповерочных интервалов (МПИ). Чем выше метрологическая надежность, тем более длительные сроки между очередными проверками. Метрологическая надежность характеризуется вероятностью безотказной работы прибора  $P(t \leq t_{\text{МПИ}})$  в период МПИ. При этом под метрологическими отказами понимаются скрытые, а не технологические отказы приборов, которые встречаются редко.

Необходимо заметить, что определение межповерочных интервалов по критерию вероятности безотказной работы не учитывает требования к необходимой точности измерения. Учет этих требований в процессе эксплуатации позволяет по иному смотреть на межповерочные интервалы. При оценке МПИ в принятом толковании задача состоит в том, что по результатам проверки главным является установление соответствия погрешности прибора его классу точности. В период использования объекта измерения важно другое – обеспечивается или нет требуемая точность измерения. Это значит, что перед

использованием прибора необходимо установить превосходит или нет погрешность прибора некоторую допускаемую погрешность измерения  $\Delta_0$ , которая должна быть определена на этапе метрологического исследования объекта измерения (см. п. 3.1.).

Принятые сейчас единые МПИ не совпадают со сроками ремонтов объектов измерения, а также с нормами ремонтов кораблей. Демонтаж приборов для производства проверок во время межремонтного срока корабля снижает готовность технических средств и отрицательно сказывается на боеготовности корабля в целом. Противоречие между сроками проверки КИП и сроками ремонтов объектов измерения может быть устранено, если в качестве МПИ назначать сроки ремонтов кораблей. Для решения этой задачи проектант должен выбрать из всего парка средств измерения такие приборы, классы точности которых удовлетворяли бы требованиям как заданной погрешности  $\Delta_0$ , так и метрологической надежности  $P(t \leq t_{МПИ})$ . Если это условие выполнить невозможно, то необходимо предусмотреть проверку пригодности средств измерения непосредственно на корабле.

Таким образом, обеспечение единства и точности измерений при эксплуатации корабельных технических средств осуществляют как специалисты метрологи, осуществляющие точное соблюдение требований нормативно-технических документов, так и специалисты, эксплуатирующие объект измерения и отвечающие за своевременность проведения мероприятий метрологического обеспечения на корабле. При таком распределении полномочий будет обеспечена эффективность метрологического обеспечения энергетического оборудования.

## **2. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КЭУ КАК ОБЪЕКТА ИЗМЕРЕНИЯ.**

### **2.1. Классификация параметров объекта измерения.**

При эксплуатации КЭУ объектами измерения являются технические средства, технологические процессы, рабочие среды и физические явления. Любой объект измерения характеризуется физическими величинами, отражающими его свойства, для выявления которых и служат собственно измерения. В корабельной энергетике измеряемые физические величины часто называют параметрами. Они несут информацию о различии объектов измерения между собой и об изменении их свойств, как с качественной, так и с количественной стороны. С качественной точки зрения параметры в зависимости от вида измеряемых величин позволяют различать физические явления, механические, электрические и теплотехнические объекты, типы технических средств и т.п., а с количественной точки зрения параметры дают информацию о свойствах, размерах и глубине рабочих процессов путем численной оценки их значений.

Многообразие физических величин, характеризующих объект измерения, вызывает необходимость в классификации параметров с целью облегчения анализа их взаимного влияния друг на друга, выявления их роли в процессе эксплуатации объекта и выделения наиболее информативных из них. Ключевыми являются три основных признака классификации: по назначению, по отношению их к объекту и по способу измерения (рис. 2.1).

По назначению следует различать параметры, несущие информацию, необходимую для регулирования технологических процессов, для защиты объектов в неординарных ситуа-





Рис. 2.1. Классификация параметров КЭУ

циях и для диагностирования технического состояния объектов в процессе их эксплуатации.

Параметры первой группы используются для оперативного контроля. Они несут информацию об отклонениях технологического процесса, на основе которой лицо, принимающее решение, производит операции по регулированию

процесса. Управляющие воздействия служат для получения максимального полезного эффекта от использования КЭУ или отдельных ее элементов.

Параметры второй группы применяются для аварийного контроля. Они необходимы для получения информации о возможности возникновения максимально допустимых отклонений, опасных для объекта. В случае их дальнейшего удаления от нормы повышается вероятность отказа объекта измерения и для предотвращения этого необходимо принимать решения по защите объекта.

Третья группа параметров предназначена для диагностического контроля, на основе которого принимаются решения по оценке технического состояния, по определению причин возникновения отказа и восстановлению работоспособности объекта измерения. В этой группе находятся параметры, используемые для прогнозирования характеристик объекта.

Среди параметров, классифицируемых по отношению к объекту измерения, можно выделить входные, внутренние и выходные группы параметров.

По характеру воздействия входные параметры отражают регулируемые воздействия, влияние на объект окружающей среды либо влияние связанных с ним элементов системы более высокого порядка. Во всех случаях воздействия, связанные с входными параметрами, носят возмущающий или регулирующий характер и их влияние необходимо учитывать при анализе результатов измерения. Вместо возмущения входной параметр может нести тестовое воздействие, подаваемое на объект с целью проверки работоспособности. В этом случае входной параметр способствует выделению полезной информации об объекте.

Внутренние параметры отражают физические процессы, происходящие в объекте измерения. К ним относятся: рабочие процессы, направленные на получение полезного эффекта, множество сопутствующих процессов, таких как нагрев, излучение тепла, вибрация, распространение шума, акустическая эмиссия, а также старение и износ. В зависимости от глубины извлечения информации о том или ином физическом процессе среди внутренних параметров выделяют технологические (технологические, электрические), структурные, и сопутствующие.

Технологические параметры дают информацию о рабочих процессах, совершающих полезный эффект, ради получения которого существует объект. К ним относятся давления, температуры и расходы рабочего тела, частота вращения роторов и валов, напряжение и сила тока в электрических цепях, перемещения клапанов, уровни в емкостях и т.д. Измерение этой группы параметров необходимо для оперативного и аварийного контроля с целью регулирования и защиты.

Они используются и для диагностического контроля, но на самом высоком энергетическом уровне. Отклонение технологических параметров от установленных норм свидетельствует о возможном изменении технического состояния, но для окончательного вывода необходим анализ и обобщение информации. В настоящее время для прямого измерения разработаны методы контроля и датчики большинства технологических параметров. Особенностью этой группы параметров является наличие глубокой взаимосвязи между ними, благодаря которой оператор извлекает дополнительную информацию об объекте измерения.

Структурные параметры характеризуют конструктивные особенности и физико-химические свойства материалов изделия и рабочих сред, находящихся в нем. К ним относятся линейные и угловые размеры (толщина стенки, величина зазора, глубина коррозии, наличие микротрещин, характеризующих целостность изделия), а также состав примесей в рабочих средах. Изменение структурных параметров ведет к появлению как постепенных, так и внезапных отказов.

Оценка изменения значений структурного параметра является целью диагностического контроля, а вид измеренного структурного параметра определяет глубину диагностирования. Например, изменение солесодержания указывает на наличие неисправности в энергетической установке, а выявление микротрещины указывает на отказ конкретного узла установки, где происходит засоление. Значения структурных параметров не всегда можно измерить, поэтому их оценивают косвенным путем. Однако по мере развития средств технического диагностирования количество видов датчиков для измерения структурных параметров постоянно растет.

Параметры сопутствующих процессов характеризуют не само изделие, а окружающий его “фон”. Эти процессы формируют физические явления и поля, несвязанные с рабочим процессом, а также отходы, выбросы и продукты износа. К ним относятся виброакустические характеристики (ВАХ), спектры излучения, частотные и амплитудные характеристики, ударные импульсы, напряжения электрического поля, частицы металла, отработавшие газы и т.д. В настоящее время эта группа параметров используется для диагностического контроля. Известно много способов как прямого, так и косвенного измерения значений этих параметров и продолжают поиски более эффективных методов. Параметры этой группы достаточно полно отражают состояние объекта и содержат необходимую для диагностирования информацию.

Таким образом, внутренние параметры обладают информацией об изменении свойств объекта измерения. Однако извлечь эту информацию не всегда представляется возможным из-за отсутствия датчиков.

Степень соответствия полезного эффекта, полученного от функционирования энергетической установки, и поставленной перед ней цели отражается выходными параметрами. Выходные параметры являются показателями качества, по которым судят о полезном эффекте, выдаваемом объектом, правильности функционирования и о его работоспособности.

В зависимости от назначения объекта выходные параметры могут отражать степень достижения цели как сложной

технической системой в целом, так и отдельными ее элементами. В первом случае параметры являются главными показателями энергетической установки. К ним относятся, например, удельный расход топлива, мощность на гребном валу и т.д. Во втором случае это параметры элементов установки, характеризующие влияние рассматриваемого элемента на функционирование всей сложной системы, например, подача насоса, производительность парового котла и т.д. Назовем эти параметры системными.

Те выходные параметры, которые используются для определения работоспособности изделия, поиска дефектов и прогнозирования являются диагностическими. Они могут содержать информацию об объекте в целом и об отдельных его узлах. В зависимости от этого различают обобщенные и частные показатели. В качестве обобщенных показателей применяют как критерии, имеющие физический смысл и обладающие размерностью (например, коэффициент полезного действия, коэффициент теплопередачи, коэффициент расхода и др.), так и искусственные критерии, являющиеся суммой или произведением частных критериев с какими-то весовыми коэффициентами. Частные диагностические параметры дают не общую, а конкретную информацию о техническом состоянии диагностируемого узла. Здесь используют структурные, технологические и сопутствующие параметры.

Для получения полезной информации необходимо, прежде всего, произвести измерение параметров. По способу получения результата измерения делят на прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения. К прямым измерениям обращаются при наличии датчика для измерения физической величины, и ее значение находят непосредственно из опытных данных. К косвенным измерениям прибегают в тех случаях, когда значение главного показателя или диагностического параметра нельзя найти путем непосредственного измерения. В этом случае его находят на основании известной зависимости между значением этой величины и значением величин, полученных при прямых измерениях после их математической обработки. Совокупные измерения применяют в тех случаях, ко-

гда для оценки состояния объекта измерения одновременно производятся и прямые и косвенные измерения. Совместными называют измерения двух или нескольких неоднородных физических величин для нахождения зависимости между ними, например, корреляционной зависимости.

В сложном объекте измерения практически все параметры связаны между собой. Взаимосвязь может носить детерминированный или стохастический характер. В первом случае между параметрами существует функциональная, а во втором случае корреляционная зависимость. Как правило, имеют место оба вида взаимосвязи, но один из них является преобладающим. Наличие любого вида взаимосвязи открывает большие возможности для обработки исходных данных и извлечения полезной для диагностирования информации.

Таким образом, классификация параметров позволяет систематизировать сотни параметров, характеризующих энергетическую установку, и способствует обоснованному отбору параметров для контроля в процессе эксплуатации.

## **2.2. Критерии важности параметров.**

Основными свойствами, указывающими на целесообразность измерения параметра, является его способность дать информацию о работе оборудования и качество этой информации. С количественной точки зрения информация характеризует величину снятой неопределенности о правильности функционирования технических средств после измерения. Разработано много методов количественной оценки информации, получаемой при измерениях [1, 18, 41]. Вскоре после создания статистической теории информации исследователи обратили внимание на неравнозначность передаваемых сигналов. О целесообразности разработки научно-технических приемов определения ценности информации, передаваемой сигналом, указывали многие авторы [3, 4].

Качество информации, поступающей к обслуживающему персоналу при наблюдении за параметром, определяется ее

полезностью для принятия решения. Для оценки степени полезности используют различные критерии ценности информации:

- величины, обратные погрешности измерения [5];
- потери эффективности управления от неточности измерения [2];
- коэффициенты чувствительности к обобщенным показателям полезного эффекта [6];
- метод экспертных оценок [3].

Применение того или иного метода обосновывается особенностями объекта контроля, характером протекания наблюдаемых технологических процессов, условиями работы оператора. Разработаны критерии ценности информации для параметров судовой дизель-энергетической установки [7] и для параметров корабельной котлотурбинной энергетической установки [3].

Рассмотрим метод определения важности параметров, учитывающий широкий круг факторов, существенных для сложной энергетической установки. Прежде всего, необходимо иметь в виду, что параметры имеют различную ценность для оперативного и аварийного контроля.

Для оперативного контроля целесообразно рассматривать информационный показатель, отражающий такие факторы, как:

- назначение получаемой информации;
- поддержание параметра в заданных пределах с помощью управляющих воздействий;

Для аварийного контроля главным является поддержание параметра в области значений, обеспечивающей безаварийную работу оборудования.

В соответствии с целями получения информации при наблюдении за изменениями значений параметра критерии ценности информации для оперативного  $W$  и аварийного  $V$  контроля должны учитывать различные стороны происходящих процессов и, следовательно, будут отличаться. В том случае,

если параметр используется одновременно для обеих целей, единый критерий ценности информации имеет вид:

$$Z = \mu W + (1 - \mu) \cdot V \quad (2.1)$$

где  $\mu$  - коэффициент, учитывающий приоритет оперативного контроля над аварийным контролем,  $0 \leq \mu \leq 1$ .

Ценность информации о состоянии объекта, которую можно получить при наблюдении за параметром определяется тремя основными компонентами:

- информационной ценностью параметра  $W_u, V_u$ ;
- целевой ценностью параметра  $W_c, V_c$ ;
- важностью контролируемого элемента  $Z_3$ .

Отсюда ценность информации при оперативном и аварийном контроле соответственно равна

$$\begin{aligned} W &= W_c \cdot W_u \cdot Z_3 \\ V &= V_c \cdot V_u \cdot Z_3 \end{aligned} \quad (2.2)$$

В целом при управлении установкой ценность информации определяется с учетом выражения (2.1)

$$Z = (\mu \cdot W_c \cdot W_u + (1 - \mu) \cdot V_c \cdot V_u) \cdot Z_3 \quad (2.3)$$

Многогранность ценности информации дополняется еще и тем обстоятельством, что она может изменяться во времени. Действительно, информация, обладающая ценностью в какой-либо период времени, может оказаться бесполезной в другой период. В частности, для корабельной энергетической установки ценность информации зависит от режимов ее использования. Будем различать значимость и ценность информации. Значимость ( $W_j(t), V_j(t)$ ) – это информационный показатель в определенный момент времени или для определенного режима использования. Ценность информации – показатель, характеризующий среднее значение значимости для всех  $k$  режимов.

При оперативном контроле ценность информации равна сумме значимостей

$$W = \sum_{j=1}^k \chi_j W_j(t) \quad \text{где } \chi_j - \text{весовой коэффициент} \quad (2.4)$$



При аварийном контроле в силу его специфики ценность информации определяется максимальным значением значимости на каком-либо режиме

$$V = [V_j(t)]_{\max} \quad (2.5)$$

Таким образом, важность параметров характеризуется целым рядом частных критериев, учитывающих различные мотивы выделения их ценности при обработке информации оператором.

### 2.2.1. Информационная ценность параметра.

Критерий информационной ценности учитывает влияние информационных характеристик параметра на ценность, основными из которых является количество информации о ходе процесса и скорость изменения параметра.

Для оперативного контроля количество информации можно оценить по формуле [1]

$$I = \ln \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta x} \quad (2.6)$$

где  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  - соответственно максимальное и минимальное значение диапазона измерений;

$\Delta x$  – погрешность измерения ;

Процесс изменения параметра характеризуется временем его изменения на величину, равную погрешности измерения  $\Delta x$ .

$$\tau_0 = \frac{\Delta x}{c_x} \quad (2.7)$$

Здесь  $c_x$  -максимальная скорость изменения параметра в переходных режимах.

Величины  $\Delta x$  и  $c_x$  не зависят от режима работа установки. Поэтому информационная значимость параметра постоянна для всех режимов и равна информационной ценности параметра

$$W_u(t) = W_u$$

С учетом выражений (2.6), (2.7) информационная ценность параметра для оперативного контроля характеризуется показателем [3]

$$W_u = \rho \cdot \frac{\Delta x}{c_x} \ln \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta x} \quad (2.8)$$

где  $\rho$  – коэффициент информативности измерения.

При аварийном контроле показатель информационной ценности параметров строится аналогично. Здесь лишь следует иметь в виду, что при аварийном контроле представляет интерес не конкретное значение параметра  $x$ , а отдельные области его значений, ограниченные предельным значением  $x_{np}$ .

В опасной зоне функционирование объекта возможно, но повышается вероятность возникновения аварии. Поэтому при превышении значений параметра предельного значения  $x_{np}$  необходимо принимать меры по защите объекта.

Очевидно, чем выше вероятность  $P(x > x_{np})$ , тем большую опасность представляют любые изменения данного параметра. В свою очередь, это означает, что чем больше индивидуальная информация

$$I'(x, x_{np}) = -\ln P(x < x_{np}) \quad (2.9)$$

тем больше оснований для введения аварийного контроля параметра.

Другой характеристикой ценности так же, как и для оперативного контроля, является время. В случае аварийного контроля это “время аварийного запаса”.

$$\tau_a = \frac{x_{np} - m_x}{c_x^a} \quad (2.10)$$

где  $c_x^a$  – максимальная скорость изменения параметра при аварийных ситуациях;

$m_x$  – среднее текущее значение параметра.

Чем меньше время  $\tau_a$ , тем более опасным с точки зрения возникновения аварии является этот параметр.

Предельное значение  $x_{np}$  и математическое ожидание  $m_x$  некоторых параметров зависят от того, на каком режиме ис-

пользуется установка. Поэтому для аварийного контроля имеем информационную значимость параметров для отдельных режимов.

$$V_u^j(t) = -\frac{c_x^a}{x_{\text{пр}}^j - m_x^j} \ln P(x < x_{\text{пр}}^j) \quad (2.11)$$

где  $X_{\text{пр}}^j$  и  $m_x^j$  - соответственно предельное значение и математическое ожидание параметра на  $j$ -том режиме.

Информационная ценность параметра аварийного контроля в соответствии с (2.5) равна

$$V_u = [V_u^j(t)]_{\max} \quad (2.12)$$

### 2.2.2. Целевая ценность параметров.

Рассматривая объект измерения в качестве элемента более сложной системы можно установить влияние любого параметра элемента на его системный параметр, характеризующий степень выполнения задачи, возлагаемой на объект для обеспечения функционирования всей системы в целом.

Системный параметр  $y$  есть некоторая функция параметров объекта контроля

$$y = f(x_1, \dots, x_m) \quad (2.13)$$

Изменение параметров  $x_1, \dots, x_m$  определяет новое значение  $y$ . Величина изменения  $\Delta y$  зависит от того, на какую величину отклоняется значение параметра  $x_i$  и от степени его влияния на системный параметр. Отклонение параметра при работе объекта лучше всего характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения  $\sigma'_x$ , а степень влияния – функцией  $U(x_1^0, \dots, x_i, \dots, x_m^0)$ , называемой функцией чувствительности, где  $x_1^0, \dots, x_m^0$  - фиксированные значения параметров.

Очевидно, что чем больше влияния оказывает параметр  $x_i$  на системный параметр, тем он важнее. Отсюда целевую значимость параметра можно оценить по его влиянию на отклонение системного параметра по формуле

$$Z_c(t) = \sigma_{x_i}' \cdot U(x_1^0, \dots, x_i, \dots, x_m^0) \quad (2.14)$$

$$\text{где } U(x_1^0, \dots, x_i, \dots, x_m^0) = U(x_i) = \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \quad (2.15)$$

–  $\sigma_{x_i}'$  – среднеквадратическое отклонение параметра  $x_i$  на определенном режиме.

Для оперативного и аварийного контроля следует использовать различные системные параметры. Для оперативного контроля в зависимости от назначения объекта в качестве системных параметров можно использовать производительность, расход топлива, мощность и т.д. Тогда для объекта, с системным параметром  $y=B$  функция (2.15) примет вид

$$U(x_i) = \left| \frac{\partial B}{\partial x_i} \right|, \quad (2.16)$$

а целевая значимость в соответствии с (2.14) определяется по формуле

$$W_c(t) = \sigma_{x_i}' \left| \frac{\partial B}{\partial x_i} \right| \quad (2.17)$$

Для аварийного контроля системным параметром является надёжность функционирования объекта, а в качестве функции (2.13) следует использовать изменение надёжности в зависимости от значений параметра. Способы определения этих функций имеются в работах [8,9]. Следовательно, для этого вида контроля

$$U_n(x_i) = \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \quad (2.18)$$

$$V_c = \sigma_{x_i}' \cdot \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \quad (2.19)$$

Значения  $\sigma_{x_i}'$  и  $U_H(x_i)$  зависят от того, на каком режиме используется установка. Поэтому в соответствии с (2.4) и (2.5) целевая ценность параметра определяется выражениями:

для оперативного контроля

$$W_c = \sum_{j=1}^k \chi_j \sigma_{x_i}' \cdot \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{x_i=x_H} \quad (2.20)$$

для аварийного контроля

$$V_c = \left[ \sigma_{x_i}' \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right] \right|_{\max} \quad (2.21)$$

Здесь  $x_H$  - значение параметра на режиме,  $\chi_j$  - весовой коэффициент режима.

### 2.2.3. Важность элементов энергетической установки.

Важность элемента энергетической установки определяется многими факторами и, по-видимому, наиболее просто может быть учтена введением некоторой весовой функции  $Z_s$ .

Анализируя ценность элементов, нетрудно видеть, что  $Z_s$  есть монотонно возрастающая функция таких характеристик, как вес  $G_s$ , габаритный объем  $V_s$ , производимая (потребляемая) мощность  $N_s$  и капитальные затраты на разработку и производство -  $C_s$ .

Однако эти факторы в процессе использования энергетической установки имеют в значительной мере второстепенное значение. В большей степени ценность элементов зависит от той роли, которую они играют в общем процессе обеспечения целевой функции систем (полезного эффекта). Так, например, роль элемента энергетической установки может быть охарактеризована величиной потери выходной мощности  $\Delta N_{вз}$ , которая возникает при отказе анализируемого устройства.

Далее, чем меньше надежность элемента (выше вероятность его отказа  $Q_s(t)$ ), тем выше обычно потребность в контроле его состояния.

Это можно интерпретировать как своеобразное “повышение” ценности элемента.

Исследуя поведение функции  $Z[G, V, N, C, \Delta K, Q(t)]$ , где  $\Delta K$  – изменение обобщенного показателя полезного эффекта системы, можно отметить следующее.

Если  $\Delta K \rightarrow 0$  при неравных нулю прочих аргументах, то  $Z_s \rightarrow 0$ , так как очевидно, что если изменение состояний элемента не сказывается на изменении показателя полезного эффекта системы, то этот элемент никакого значения не имеет в свете задач, решаемых системой. Очевидно, что если одновременно  $G_s \rightarrow 0, V_s \rightarrow 0, N_s \rightarrow 0, C_s \rightarrow 0$ , но  $\Delta K \neq 0$ , то функция  $Z_s$  также должна стремиться к нулю, поскольку при  $G_s = 0, V_s = 0, N_s = 0, C_s = 0$ , элемент “исчезает” и, следовательно не может иметь какой-либо ценности. Наконец, при  $Q(t) \rightarrow 0$  и неравных нулю прочих аргументах функция  $Z_s$  не может быть равна нулю. Это свойство определяется тем, что при очень высокой надежности рассматриваемого элемента или достаточно малом времени его использования все же может появиться необходимость в контроле его состояния, хотя бы для целей оперативного управления и согласования с сопряженными элементами.

Наиболее простой функцией, свойства которой аналогичны описанным, является функция вида

$$Z_s = [\beta + Q(t)]g_1(\alpha_1g_2 + \alpha_2g_3 + \alpha_3g_4 + \alpha_4g_5), \quad (2.22)$$

где  $\beta, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  - постоянные коэффициенты,  $g_1 = \frac{\Delta K}{K}$  - относительное изменение показателя полезного

эффекта,  $g_2 = \frac{G_s}{G}, g_3 = \frac{V_s}{V}, g_4 = \frac{N_s}{N}, g_5 = \frac{C_s}{C}$  - соответственно относительная масса, габаритный объем, производимая или потребляемая мощность, капитальные затраты. (Здесь  $G, V, N, C$  - вес, габаритный объем, потребляемая или производимая мощность, капитальные затраты на систему в целом).

Значения постоянных коэффициентов  $\beta, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  могут быть получены методом экспертных оценок [10, 11].

Исследования показывают [3], что значения  $Z_3$  существенно зависят от величин показателя энергетического уровня элемента. Это позволяет сравнительно просто оценить значение функции  $Z_3$  по формулам:

для котлов, теплообменных аппаратов и систем

$$Z_3 \approx 0,32 \left( \frac{N_3}{N_u} \right)^{1,24} \quad (2.23)$$

для главных и вспомогательных механизмов

$$Z_3 \approx 0,64 \left( \frac{N_3}{N_u} \right)^{0,91} \quad (2.24)$$

где  $N_3$ ,  $N_u$  - потребляемая или производимая мощность соответственно элемента и источника энергии в установке.

Изложенная методика определения ценности информации сложна для непосредственного применения из-за обилия формул и неопределенности некоторых предлагаемых коэффициентов. Но она полезна тем, что раскрывает различные аспекты ценности информации, охватывает все стороны использования оборудования и их влияние на важность контролируемого параметра. При анализе параметров можно использовать фрагменты методики для оценки влияния отдельных факторов на их важность.

*Пример. Найдем ценность информации, получаемой при измерении параметров котлотурбинной установки, контролируемых в посту дистанционного управления.*

*Результаты расчета ценности информации приведены в таблицах 2.1 и 2.2. Таблица 2.1 соответствует параметрам котельной установки, таблица 2.2 - параметрам турбинной установки. Для проверки достоверности расчетов проведена психометрическая экспертная оценка важности параметров. Она получена путем независимого опроса вахтенных механиков, хорошо знающих установку и имеющих большой опыт эксплуатации ее. По результатам расчетов и экспериментальной проверки произведена ранжировка параметров. Ранги*

параметров, полученные в результате ранжировки, приведены в таблицах.

Таблица 2.1

Наименование контролируемых величин	Значение показателя	Теоретический ранг	Экспериментальный ранг
Положение маховика нагрузки	0,175	3	1
Давление пара в котле	0,253	1	2
Давление топлива перед форсункой	0,195	2	3
Уровень воды в котле	0,075	5	4
Частота вращения ТНА	0,046	6	5
Перепад давления на золотнике	0,019	8	6
Давление топлива перед пультом	0,130	4	7
Температура перегретого пара	0,030	7	8
Температура воды за экономайзером	0,010	9	9
Температура подшипников ТНА	0,005	10	10
Давление масла в коллекторе ТНА	0,001	11	11

Таблица 2.2.

Наименование контролируемых величин	Значение показателя	Теоретический ранг	Экспериментальный ранг
Частота вращения линии вала	0,125	2	1
Давление пара перед 2-ой группой сопел	0,142	1	2
Вакуум в конденсаторе	0,105	3	3
Напор питательного насоса	0,104	4	4
Давление пара в маневровом устройстве	0,060	8	5
Давление пара перед 1-ой группой сопел	0,098	5	6
Давление пара в регулировочной ступени	0,065	7	7
Давление пара перед 3-ей группой сопел	0,028	10	8
Частота вращения ТЦН	0,007	11	9
Температура подшипников ГТЗА	0,032	9	10
Температура пара в маневровом устройстве	0,075	6	11



*В таблицах указаны значения для каждого параметра, место параметра в ряду, ранжированном теоретически по результатам расчета в порядке уменьшения показателя и осредненный ранг параметра, назначенный экспертом. Экспериментальная проверка показала хорошую сходимость результатов. Степень совпадения обоих рядов можно оценить коэффициентом ранговой корреляции. Для параметров котельной установки он составляет  $\Theta = 0,98$ , для параметров турбинной установки -  $\Theta = 0,92$ .*

### **2.3. Параметры состояния и параметры наблюдения объекта измерения.**

Параметры объекта измерения используются для определения качества его функционирования, правильности выполнения им своего предназначения и пригодности его к применению. Их значения определяются при прямых, косвенных, совместных и совокупных измерениях [12]. Соответствие значений параметров нормам, установленным в эксплуатационной документации, означает, что объект измерения обладает набором требуемых свойств. В противном случае полученная при измерениях информация служит для принятия соответствующих решений и управляющих воздействий.

Обработка информации полученной при измерениях, как правило, происходит при совокупных и совместных измерениях, т.е. при одновременном измерении значений нескольких параметров, отражающих то или иное свойство объекта измерения. В последнее время с развитием теории управления и технической диагностики все чаще стал использоваться термин “состояние”, отражающий соответствие свойств объекта измерения и совокупности значений его параметров.

Понятие состояния физической системы или физического процесса трудно поддается общему определению из-за большого разнообразия физических объектов: непрерывных и дискретных, статических и динамических, логических и статистических и т.д. В теории измерений, основанной на точной

математической науке, состояние объекта измерения может быть определено в математических терминах.

По существу при совокупных и совместных измерениях экспериментаторы имеют дело с оценкой состояния объекта измерения, которое можно определить как совокупность значений параметров, полученных путем измерения и исчерпывающе характеризующих объект. Отсюда состояние объекта измерения может быть представлено в виде элемента  $s$  множества  $S$  возможных состояний, в котором расстояние между ближайшими элементами определяется точностью измерений. Множество состояний  $S$  можно рассматривать как метрическое пространство состояний объекта, в котором расстояние между двумя соседними элементами, принадлежащими ему ( $S_1 \in S$  и  $S_2 \in S$ ), определяется погрешностью измерения всех координат пространства состояний (параметров объекта измерения).

Расстояние между любыми двумя соседними элементами  $S$  и  $S'$  является действительной функцией  $R(S, S')$ , удовлетворяющей трем аксиомам метрического пространства:

1.  $R(S, S') = 0$  при  $S = S'$
2.  $R(S, S') = R(S', S)$
3.  $\rho(S, S'') \leq R(S, S') + R(S, S'')$ .

Пространство состояний можно использовать для анализа объектов измерений, характеризующихся как независимыми, так и взаимосвязанными между собой параметрами.

В первом случае, если параметры не зависят между собой, для оценки состояния необходимо вести наблюдение за всеми параметрами состояния.

Пространство состояния здесь является евклидовым пространством, а расстояние между двумя соседними точками в нем определяется евклидовой метрикой

$$R(S, S') = \sqrt{(S, S')}.$$

Во втором случае, когда между параметрами имеются какие-либо зависимости, необходимо учитывать взаимосвязь параметров. Если среди параметров состояния выделить группу независимых параметров, то наблюдение за объектом измерения можно осуществлять только по части параметров со-

стояния, т.е. только по независимым параметрам. Эти параметры целесообразно назвать параметрами наблюдения. Пространство, образуемое ими, назовем пространством наблюдения.

При отсутствии взаимосвязи параметры состояния являются и параметрами наблюдения, а пространство состояния совпадает с пространством наблюдения. Пользуясь взаимосвязью можно выделить несколько групп параметров наблюдения, каждая из которых образует свое пространство наблюдения. В этом случае пространства наблюдения не совпадают с пространством состояния и являются его частью. В новых координатах параметров наблюдения расстояние между двумя соседними точками будет определяться уже не евклидовой метрикой, а более сложной метрикой риманова пространства.

Рассмотрим это положение более подробно. Предварительный анализ любого объекта измерения показывает, что между параметрами, характеризующими его состояние, всегда существуют некоторые соотношения, которые выражают в виде математической зависимости реальные физические связи. Примерами таких соотношений являются уравнения сплошности, материального и теплового баланса, зависимости, отражающие состояние газа, пара, законы теплообмена, гидродинамики и т.д.

Предположим, что объект измерения в пространстве состояния  $P$  характеризуется вектором  $p$  с координатами  $p_1, p_2, \dots, p_n$  и между ними имеет место соотношение

$$f(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0 \quad (2.25)$$

Множество  $S$  всех точек  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ , удовлетворяющих уравнению (2.25), называется гиперповерхностью пространства  $P$ .

Если функция  $f$  имеет в области изменения параметров  $G$  непрерывные частные производные по переменным  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , то в каждой точке  $p$  области  $G$  определен градиент функции  $f$ .

$$\text{grad}f(\mathbf{p}) = \left( \frac{\partial f}{\partial p_1}, \frac{\partial f}{\partial p_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial p_n} \right)$$

Если функция  $f$  линейная, и хотя бы один из коэффициентов, стоящих перед переменной  $p_i$  отличен от нуля, то в этом случае гиперповерхность представляет собой гиперплоскость.

Пусть теперь имеется  $h$  гиперповерхностей  $S_1, S_2, \dots, S_h$ , каждая из которых отражает реально существующую физическую связь между координатами  $p_i$ . В пространстве состояния  $P$  они заданы соответственно уравнениями

$$\begin{aligned} f_1(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0 \\ f_2(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0 \\ &\dots\dots\dots \\ f_n(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Пересечение  $m$  всех этих гиперповерхностей, т.е. множество всех точек  $p \in P$ , удовлетворяющих одновременно всем уравнениям (2.26), называется  $m$ -мерным многообразием с размерностью  $(m = n - h)$ , которое в пространстве состояния  $P$  задается системой  $(n-m)$  уравнений. В частности, при  $h=1$   $(n-1)$ -мерное многообразие задается одним уравнением и совпадает с гиперповерхностью  $S$ .

Предположим, что осуществляется наблюдение сложного физического явления, описываемое соотношениями (2.26).

Любому состоянию этого физического явления соответствует определенная точка  $M$  многообразия в пространстве состояния  $P$ , которая принадлежит всем гиперповерхностям, образующим многообразие. Следует обратить внимание, что в соответствии с законом или моделью, отражающими это физическое явление, точка  $M$  находится не в любой точке пространства  $P$ , а только на многообразии. В противном случае закон или модель неверно отражают сущность физического явления. Отметим сразу, что точность математических моделей в рассматриваемой работе играет второстепенную роль.

Анализ уравнений (2.26) показывает, что для определения точки  $M$  в пространстве  $P$  нет необходимости в измерении всех параметров (координат) пространства. Уравнения (2.26) связывают между собой параметры  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Значение любого из этих параметров, например,  $p_n$ , можно определить, зная значения остальных параметров  $p_1, p_2, \dots, p_{n-1}$ . Следовательно, пространство  $P$ , порожаемое координатами  $p_1, p_2, \dots, p_n$  совпадает с подпространством, порожаемым координатами  $p_1, p_2, \dots, p_{n-1}$ . Не изменяя пространства  $P$ , можно исключить из системы порождающих координат всякий параметр, являющийся комбинацией остальных. Произведя такое исключение последовательно  $h$  раз в соответствии с количеством уравнений (2.26), можно добиться того, что из первоначальной системы координат останутся только независимые между собой, составляющие базис пространства и порождающие подпространство  $X$  размерности  $n-h$ , который по существу являются пространством наблюдения.

Отсюда следует, что пространство наблюдения отличается от пространства состояния тем, что его образуют только независимые параметры, образующие базис пространства. Кроме того, благодаря взаимосвязи параметров в пространстве состояния возможно существование нескольких пространств наблюдения.

Реально существующее явление, отражаемое уравнениями (2.26), не зависит от того, в какой системе координат это явление рассматривается. В любой системе координат это явление всегда можно физически истолковать. На практике для контроля технологического процесса используют, как правило, какую-либо одну из возможных координатных систем. В этом случае точка  $M$ , характеризующая состояние физического явления в пространстве  $P$ , отображается точкой  $M'$  в пространстве наблюдения  $X$ , которое является подпространством в пространстве состояния  $P$ . Тем самым допускается, что для наблюдения физического явления нет необходимости знать положение точки  $M$ , достаточно знания ее образа  $M'$ . Решения по управлению и обслуживанию энергетической установки при-

нимается на основе анализа положения образа  $M'$ , находящегося в пространстве наблюдения.

Рассмотрим  $m$  – мерное многообразие, выражаемое уравнениями (2.26), в  $n$  – мерном пространстве состояния  $P$  и вычислим дифференциал дуги по кривой, расположенной на многообразии в координатах  $x_1, \dots, x_m$  пространства наблюдения  $X$ . Он равен [13]

$$dS^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_{ij}(x_1, \dots, x_m) dx_i dx_j \quad (2.27)$$

Выражение (2.27) является дифференциальной квадратичной формой и определяет метрику пространства наблюдения. Используем определение риманова пространства. Римановым пространством называется многообразие, в котором задана инвариантная дифференциальная квадратичная форма. Отсюда пространство наблюдения, в котором находится многообразие, является римановым пространством с симметричным тензором  $G$ , если соблюдается условие

$$\text{Det}|G| \neq 0$$

Метрический тензор  $G$  характеризует структуру риманова пространства и представляет собой квадратную матрицу вида

$$G = \begin{vmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1m} \\ & G_{22} & \dots & G_{2m} \\ & & \dots & \dots \\ & & & G_{mm} \end{vmatrix} \quad (2.28)$$

Напишем выражения для компонент  $G_{ij}$  метрического тензора  $G$ . При известных соотношениях (2.26) компоненты метрического тензора в общем виде находятся из выражения [13].

$$G_{ij}(p_1, p_2, \dots, p_n) = \left[ \frac{\partial p_1}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x_j} + \frac{\partial p_2}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x_j} + \dots + \frac{\partial p_n}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x_j} \right] \quad (2.29)$$

Приведем выражения для компонентов метрического тензора в координатах  $x_1, x_2, \dots, x_m$ .

Для диагональных элементов тензора (2.28) они равны

$$\begin{aligned}
 G_{11} &= \left(\frac{\partial p_1}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_2}{\partial x_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial p_m}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{m+1}}{\partial x_1}\right)^2 + \dots + \\
 &+ \left(\frac{\partial p_n}{\partial x_1}\right)^2 \\
 G_{22} &= \left(\frac{\partial p_1}{\partial x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_2}{\partial x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial p_m}{\partial x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{m+1}}{\partial x_2}\right)^2 + \dots + \\
 &+ \left(\frac{\partial p_n}{\partial x_2}\right)^2
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

$$\begin{aligned}
 G_{mm} &= \left(\frac{\partial p_1}{\partial x_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_2}{\partial x_m}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial p_m}{\partial x_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{m+1}}{\partial x_m}\right)^2 + \dots + \\
 &+ \left(\frac{\partial p_n}{\partial x_m}\right)^2
 \end{aligned}$$

Для всех остальных элементов они равны

$$\begin{aligned}
 G_{12} = G_{21} &= \frac{\partial p_1}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x_2} + \frac{\partial p_2}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x_2} + \dots + \frac{\partial p_n}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x_2} \\
 G_{23} = G_{32} &= \frac{\partial p_1}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x_3} + \frac{\partial p_2}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x_3} + \frac{\partial p_n}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x_3} \\
 &\dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 G_{m-1m} = G_{mm-1} &= \frac{\partial p_1}{\partial x_{m-1}} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x_m} + \frac{\partial p_2}{\partial x_{m-1}} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x_m} + \dots
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

В том случае, если  $G_{ik} = 0$  ( $i \neq k$ ), а  $G_{ii} = 1$  имеем обычное евклидово пространство. При  $G_{ik} \neq 1$  происходит деформация пространства наблюдения:  $G_{ii} > 1$  – сжатие, при  $G_{ii} < 1$  – растя-

жение. Если  $G_{ik} \neq 0$  ( $i \neq k$ ), то происходит еще более сложное искажение пространства наблюдения. Следовательно, метрический тензор характеризует структуру риманова пространства.

Таким образом, пространство  $X$ , в котором производится наблюдение за состоянием объекта измерения, характеризуется метрическим тензором, который определяется с помощью уравнений (2.26). Они отражают наблюдаемое физическое явление. Зная метрический тензор, можно определить метрику пространства наблюдения  $X$ . Это метрика риманова пространства.

Проведенный анализ пространства состояния и выявление структуры пространства наблюдения позволяет сделать заключение о существовании особых свойств у объекта измерения. Они обусловлены наличием взаимосвязи между параметрами. Эти свойства проявляются в том, что, благодаря взаимосвязи параметров, принципиально существует несколько пространств наблюдения, каждое из которых обладает своей метрикой. Они позволяют выделить из всей информации, относящейся к объекту измерения, именно ту, которая лучше всего характеризует происходящие в объекте физические процессы. Свойства объекта измерения, характеризующие информативность параметров, необходимых для целей управления и обслуживания, правомерно называть метрическими свойствами.

Как следует из анализа научно-технической литературы, при обработке результатов измерения сложились определенные концепции, по существу отражающие метрические свойства объекта.

В классической метрологии для оценки погрешности косвенного измерения используют формулу, известную под названием закона сложения погрешностей. Метрические свойства объекта проявляются здесь через чувствительность величины косвенного измерения к параметрам прямого измерения, т.е. через соответствующие частные производные в формуле, отражающей закон сложения погрешностей [12].

Для математической обработки результатов измерений широко применяется метод наименьших квадратов, разрабо-



танный в начале столетия А.И.Лежандром и К.Ф.Гауссом [14]. В метрологии этот метод используется для исключения систематической ошибки измерения. Его применяют в том случае, когда оцениваются величины, связанные между собой несколькими условиями, записываемые в виде условных уравнений, (например, сумма углов треугольника равна  $180^\circ$ ). Учет условий позволяет получить поправку к оценке измеряемых величин и значительно повысить точность результата измерений.

Метрические свойства объекта измерения отражаются в его математической модели, уравнения которой воспроизводят взаимосвязь измеряемых величин. Они определяют ценность информации, поступающей к оператору, оказывают влияние на выбор контролируемых параметров и обуславливают требуемую точность их измерения.

С точки зрения ценности информации метрические свойства характеризуют информативность физических величин, характеризующих объект управления. Она выражается через целевую ценность, отражающую взаимосвязь системного параметра с внутренними параметрами объекта измерения (см. п. 2.2). Для независимых параметров состояния, составляющих евклидово пространство, целевая ценность всех параметров одинакова. Для взаимозависимых параметров их ценность для целей управления и обслуживания будет различна.

Выбор контролируемых параметров, опираясь на метрические свойства, может быть основан на том, что благодаря взаимосвязи параметров существует несколько базисов для пространства наблюдения, образуемого независимыми параметрами. Учитывая, что каждое пространство наблюдения обладает своим метрическим тензором, можно ожидать, что выделенные группы независимых параметров также являются неравноценными. Опираясь на метрические свойства объекта измерения целесообразно выделять наилучшую с точки зрения измерения группу параметров.

Использование метрических свойств при обосновании необходимой точности измерения параметров основывается на различной чувствительности параметров состояния к параметрам

рам наблюдения. Коэффициенты чувствительности входят в качестве составляющих в формулы для расчетов компонент метрического тензора. Это видно из формул (2.30) и (2.31). Для расчетов погрешности коэффициенты чувствительности используются и в методе наименьших квадратов и при расчете погрешности косвенного измерения. Вполне возможно, что для оценки обобщенных или системных параметров объекта в различных системах координат пространства наблюдения можно найти такую группу параметров непосредственного измерения, в которой погрешность косвенного измерения будет меньше.

Таким образом, метрические свойства объекта измерения можно использовать для обоснования выбора непосредственно измеряемых параметров, их информативности и необходимой точности измерения.

*Пример 1. Рассмотрим физическое явление, которое характеризуется тремя физическими величинами  $p_1, p_2, p_3$  и двумя линейными уравнениями, связывающими их.*

$$p_1 + p_2 + p_3 - 2 = 0 \quad (2.32)$$

$$2p_1 - p_2 + 3p_3 - 1 = 0 \quad (2.33)$$

*Эти два уравнения определяют прямую линию в трехмерном пространстве, которая в данном случае является многообразием. На рис. 2.2 изображено трехмерное пространство и две плоскости  $Q$  и  $P$  в нем. Все состояния наблюдаемого физического явления находятся в положительной области изменения параметров и отражаются точками, лежащими на линии пересечения плоскостей  $N-K$ .*

*Наблюдение технологического процесса, характеризующего приведенными выше уравнениями, и его состояния в точке  $M$ , можно осуществить по одной непосредственно измеряемой величине. Если этими величинами является одна из координат  $p_1, p_2, p_3$ , то любое состояние физического явления в целом, характеризуемое оригиналом точкой  $M$ , можно наблюдать по одному из его образов  $M_1, M_2, M_3$  (рис. 2.2), находящемуся соответственно на координатах  $p_1, p_2, p_3$ .*

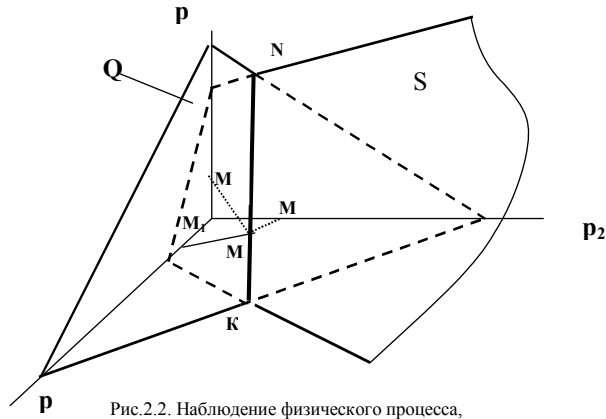


Рис.2.2. Наблюдение физического процесса, характеризуемого двумя линейными уравнениями.

Подчеркнем, что состояние объекта измерения характеризуется точками, лежащими только на прямой N-K. Для нахождения расстояния между двумя ближайшими точками на прямой N-K воспользуемся выражением (2.27). На прямой метрический тензор (2.28) вырождается в один компонент  $G_{11}$ , который находится с помощью выражения (2.30). Для этого необходимо с помощью исходных уравнений (2.32) и (2.33) выразить через наблюдаемую физическую величину, например  $p_1$ , остальные физические величины  $p_2$  и  $p_3$ , взять соответствующие производные и определить значение компонента метрического тензора:

$$p_2 = 1,25 - 0,25 p_1$$

$$p_3 = 0,75 - 0,75 p_1$$

$$G_{11} = 1 + 0,25^2 + 0,75^2 = 1,625$$

Проведем подобные операции с двумя оставшимися величинами и получим значения компонент метрического тензора для двух других физических величин:  $G_{22} = 26$ ,  $G_{33} = 2,44$ .

Подставляя компоненты метрического тензора в выражение (2.27) получим дифференциалы расстояния на прямой N-K для каждого из рассмотренных случаев

$$ds^2 = 1,625(dp_1)^2; ds^2 = 26(dp_2)^2; ds^2 = 2,44(dp_3)^2 \quad (2.34)$$

Дифференциалы (2.34) определяют метрику пространства наблюдения, которым в рассматриваемом примере явля-

ется одна из координат  $p_1$ ,  $p_2$  или  $p_3$ . Коэффициенты в этих выражениях характеризуют метрические свойства объекта измерения. Из выражений (2.34) следует что наблюдение физических величин в различных пространствах наблюдения  $p_1$ ,  $p_2$  или  $p_3$  неравноценно для определения состояния объекта, в котором происходящие процессы характеризуются уравнениями (2.32) и (2.33). При одной и той же точности измерения координат минимальное расстояние между бесконечно близкими точками будет определено при наблюдении координаты  $p_1$ . Следовательно, эта координата является наиболее информативной и обладает наибольшей разрешающей способностью.

*Пример 2.* Рассмотрим состояние водяного пара. Известно, что оно характеризуется такими параметрами как: температура, давление, энтальпия, энтропия, удельный объем, удельная теплоемкость, теплопроводность, вязкость и др. Они связаны между собой известными формулами, предложенными Международной Ассоциацией по свойствам воды и водяного пара, которые позволяют определить значения любого параметра, если известны значения двух из них. В настоящее время разработан пакет программ «WaterSteamPro», предназначенный для вычислений теплофизических свойств воды и водяного пара в широком диапазоне исходных данных [79].

Водяной пар как объект измерения также обладает метрическими свойствами. Найдем значения компонент метрического тензора, характеризующего эти свойства.

Для практических целей интерес представляет состояние пара в координатах температуры, давления, энтальпии и энтропии. Энтальпия характеризует эффективность использования пара, а энтропия – потери, связанные с его использованием. Для определенности примем, что состояние пара определяется в области, определяемой значениями температуры и давления пара, равными соответственно 350 °С и 4 МПа. Произведем расчет значений компонент метрического тензора в пространстве наблюдения, определяемого температурой и давлением. Для расчетов использованы выражения (2.30) и (2.31). Результаты расчетов представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3.

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Расчетное значение
Параметры состояния			
- температура	$t$	°С	300
- давление	$p$	МПа	5
- энтальпия	$h$	ккал/кг	698,78
- энтропия	$s$	ккал/кг·К	1,4835
Параметры наблюдения			
- температура	$t$	°С	300
- давление	$p$	МПа	5
Частные производные в относительной форме	$\frac{\partial h}{\partial t} \cdot \frac{t}{h}$	–	0,32
	$\frac{\partial s}{\partial t} \cdot \frac{t}{s}$	–	0,26
	$\frac{\partial h}{\partial p} \cdot \frac{p}{h}$	–	0,0658
	$\frac{\partial s}{\partial p} \cdot \frac{p}{s}$	–	$4,8 \cdot 10^{-5}$
Компоненты метрического тензора	$G_{11}$	–	1,16
	$G_{22}$	–	1,004
	$G_{12}$	–	2,1

Уравнения, описывающие состояние пара, позволяют определить все его параметры и в других пространствах наблюдения, например, в координатах  $h$ - $p$  или  $s$ - $p$ . Значения компонент метрического тензора зависят от того, в каких координатах производится наблюдения. Для сравнения они приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Компоненты метрического тензора	Координаты пространства наблюдения		
	$t$ - $p$	$h$ - $p$	$s$ - $p$
$G_{11}$	1,16	11,9	17,3
$G_{22}$	1,004	3,79	1326
$G_{12}$	2,1	5,24	20,1

Результаты расчетов показывают, что все анализируемые пространства наблюдения водяного пара являются римановым пространством. Об этом свидетельствуют недиагональные метрические тензоры пространств наблюдения. Метрические свойства водяного пара как объекта наблюдения

зависят от того, в каком пространстве производится наблюдение. Из таблицы следует, что в рассматриваемой точке наблюдения лучшим пространством наблюдения является пространство, определяемое координатами  $p$  и  $t$ .

Отметим, что значения частных производных, а, следовательно, и компонент метрического тензора зависят от значений параметров пара. Поэтому метрические свойства пространств наблюдения за состоянием водяного пара зависят от точки наблюдения. Для анализа метрических свойств необходимо провести исследование во всей области изменения параметров, характерной для конкретной практической задачи.

#### **2.4. Область работоспособности объекта измерения.**

Состояние объекта измерения определяется набором значений характеризующих его параметров. Они указывают координаты точки в пространстве состояния в рассматриваемый момент времени. С течением времени или по каким-либо другим причинам значения параметров и, следовательно, его состояние изменяются. Множество состояний, отражающих функциональную пригодность объекта измерения, образует область работоспособности в пространстве состояний [15].

В зависимости от соотношения состояния объекта измерения и его области работоспособности определяется вид технического состояния. Другими словами, вид технического состояния – это подмножество таких его состояний, о которых может быть принято одно и то же решение, согласованное с целью проводимого контроля. Для оперативного и аварийного контроля рассматривают два вида технического состояния: правильное функционирование и неправильное функционирование. Для диагностирования их устанавливают больше: исправное (объект соответствует всем требованиям), неисправное (объект не соответствует хотя бы одному требованию), работоспособное (выполняются все функции), неработоспособное (не

выполняется хотя бы одна функция) [16]. Существует и более детальное деление состояний по классам [17].

При разработке и изготовлении конкретного изделия ему придается ряд свойств, которые в совокупности определяют качество объекта и безопасность его использования. Каждому из этих свойств соответствуют определенные значения параметров и требования, вытекающие из условий целевого применения объекта. Несоответствие хотя бы одного из этих свойств установленным требованиям свидетельствует о наличии дефекта, следствием которого является выход значений параметров за определенные пределы.

Поэтому при эксплуатации объекта по результатам измерений чаще необходимо оценить не столько положение точки в пространстве, сколько вынести суждение о функциональной пригодности объекта или о принадлежности его к тому или иному классу. При вынесении такого суждения необходимо сравнить текущее значение каждого параметра состояния с некоторым опорным значением, т.е. осуществить контроль технического состояния.

Опорные значения устанавливают границы, разделяющие виды технического состояния или уровни его работоспособности. Контроль осуществляется путем сопоставления текущих значений тех или иных параметров или показателей с их опорными значениями. Приведем общую характеристику опорных значений. Вокруг них концентрируется внимание обслуживающего персонала. Текущее (измеренное) значение параметра  $X$  – это значение параметра в данный момент эксплуатации, установленное в результате его измерения обслуживающим персоналом с помощью определенных средств измерения.

Предельное значение параметра  $X_{пр}$  – это расчетное наибольшее или наименьшее значение параметра, при достижении которого наступает предельное состояние оборудования. Термин “предельное состояние” определяется как состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности, или неустранимого ухода параметра за установлен-

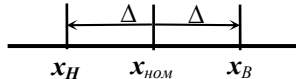
ные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, или необходимости проведения среднего или капитального ремонтов.

Номинальное значение параметра  $X_n$  – это значение, определенное его функциональным назначением. Оно указывается в инструкциях по обслуживанию для начального периода эксплуатации и служит началом отсчета отклонений. Выбор номинального значения производится расчетным путем (специальными испытаниями) на основании исходных данных, заданных техническими условиями, ГОСТами, ОСТАми и другими нормативными документами.

Рабочее значение параметра  $X_p$  – это установленное инструкцией значение параметра на различных этапах старения, износа, а также с учетом влияния внешних факторов в течение всего периода эксплуатации. Совокупность рабочих значений составляет рабочую характеристику параметра. Рабочее значение параметра рассчитывается при проектировании или находится из опыта эксплуатации и может принимать различные значения в зависимости от наработки, нагрузки оборудования и внешних условий. В начальный период эксплуатации оно может совпадать с номинальным значением. При необходимости для наиболее важных параметров на рабочее значение могут накладываться ограничения в виде допустимых отклонений. Качество функционирования объекта обеспечивается тем, что при выходе текущего значения за пределы допустимого отклонения вводится управляющее воздействие.

По виду (форме) допустимые отклонения делятся на два типа:

- двухстороннее симметричное -  $x_{ном} \pm \Delta$

$$\Delta = \frac{x_B - x_H}{2}$$


The diagram shows a horizontal line with three points marked:  $x_H$  on the left,  $x_{ном}$  in the center, and  $x_B$  on the right. Two horizontal arrows of equal length extend from  $x_{ном}$  to  $x_H$  and from  $x_{ном}$  to  $x_B$ . Each arrow is labeled with the Greek letter  $\Delta$ .

- двухстороннее асимметричное -  $x_{ном} \begin{matrix} +\Delta_B \\ -\Delta_H \end{matrix}$





Допускное значение параметра (уставка)  $X_d$  – это установленное инструкцией наибольшее или наименьшее значение параметра, при достижении которого резко ухудшается качество и надежность функционирования оборудования. Оно назначается для обеспечения безотказности и долговечности технических средств. Заданная надежность функционирования обеспечивается тем, что при переходе текущего значения параметра за допускное значение вводится управляющее воздействие, направленное на поддержание работоспособного состояния. Такими воздействиями являются меры защитного характера (снижение мощности, вывод из действия основного и запуск резервного механизма и т.п.) или операции по техническому обслуживанию и ремонту.

Разность между номинальным и допускным значениями является допускным отклонением. Его следует отличать от допустимого отклонения. Первое назначается в целях обеспечения безопасности и надежности оборудования, а второе служит для поддержания требуемого качества его функционирования.

Опорные значения параметра разделяют область его возможного изменения в процессе эксплуатации на три части: рабочую, опасную, аварийную, которой соответствует предельное состояние объекта (рис. 2.3).

В рабочей области находится номинальное или рабочее значения параметра. Текущее значение в ней всегда меньше допускного значения.

Предельное состояние	Опасная область	Рабочая область	Опасная область	Предельное состояние	
	Допустимая область				
	$X_{пр}^{max}$	$X_d$	$X_n$	$X_d$	$X_{пр}^{min}$

Рис 2.3 Область работоспособности объекта измерения

Опасная область расположена между допускным и предельным значениями. При нахождении текущего значения в опасной области функционирование изделия возможно, но резко возрастает вероятность отказа. В ней оборудование также работоспособно. Совокупность рабочей и опасной областей представляет собой область работоспособности.

Если текущее значение превышает предельное, то параметр попадает в аварийную область. Для оборудования наступает предельное состояние и его дальнейшее функционирование становится невозможным (недопустимым). В аварийной области оборудование неработоспособно.

Изложенная структура области работоспособности справедлива при односторонних ограничениях на значения параметра, когда номинальное значение меньше допускного, а допускное меньше предельного. Для двусторонних ограничений ее структура показана на рисунке 2.3.

Таким образом, область работоспособности характеризуется тремя опорными значениями параметров: номинальным -  $X_n$ , допускным -  $X_d$  и предельным -  $X_{пр}$ . Разность между допускным и номинальным значениями является допуском параметра

$$\Delta X = X_d - X_n$$

Пример. Опорные значения такого параметра как температура подшипников равны:

$X_n = 60^\circ\text{C}$  - номинальное значение,

$X_d = 75^\circ\text{C}$  - допускное значение,

$X_{пр} = 100^\circ\text{C}$  - предельное значение, обусловленное температурой плавления баббита.

Для многомерных объектов измерения, характеризующихся конечным множеством параметров состояния, область работоспособности ограничивается функциями предельного состояния. Для взаимосвязанных параметров они образуют замкнутую гиперповерхность, (в простейшем случае, например, сферу, в центре которой находится точка, значения координат которой определяются номинальными значениями контролируемых параметров).

Для наглядности рассмотрим функцию предельного состояния  $f(x_1, x_2)$  простейшего двумерного объекта измерения (см. рис. 2.4а), для которого функция предельного состояния представляет собой линейную зависимость. Ее выражение можно записать в виде

$$\phi(x_1, x_2) = \frac{x_1}{x_1^{пр}} + \frac{x_2}{x_2^{пр}} \quad (2.35)$$

Для функции предельного состояния (2.35) допустимая область расположена в треугольнике, сторонами которого являются оси координат и линия  $X_1^{пр} - X_2^{пр}$ .

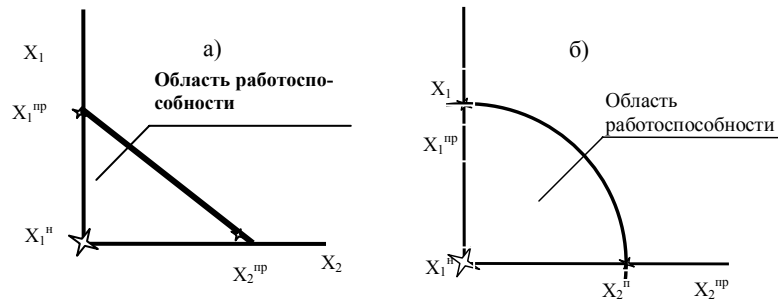


Рис 2.4 Область работоспособности в двумерном пространстве

Для установления вида функции предельного состояния для многомерного случая необходимо исследовать физические процессы, происходящие в объекте контроля. Так, граница допустимой области для измеряемых величин определяется некоторой поверхностью в том случае, если ограничения задаются для обобщенных показателей. Например, если обобщенный показатель выражен линейной зависимостью, допустимая область ограничивается плоскостью. Если он выражен квадратичной зависимостью, то эллипсоидом. На рис. 2.4 представлены границы допустимой области для двумерного пространства наблюдения, в котором обобщенный показатель имеет вид линейной зависимости (рис. а) и квадратичной зависимости (рис. б).

Таким образом, область работоспособности характеризуется опорными значениями параметра, играющими большую роль в обеспечении качества эксплуатации и надежности технических средств корабля. Обоснование опорных значений необходимо для выполнения требований по метрологическому обеспечению и должно производиться разработчиком изделия в процессе проектирования при метрологическом исследовании объекта измерения. Однако такое обоснование часто отсутствует для большинства контролируемых параметров (см. п. 1.2.).

Наиболее благополучно обстоит дело с обоснованием номинальных значений. Его можно позаимствовать из тепловых, гидравлических и др. расчетов всего оборудования или отдельных его узлов. Предельные значения чаще всего принимаются на основании специальных испытаний или из опыта эксплуатации. Допускные значения, как правило, назначаются с учетом некоторого запаса.

В последующих главах даны рекомендации для обоснования, как опорных значений параметров, так и их допустимых отклонений.

### 3. ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ.

#### 3.1. Предназначение погрешностей.

Оценка технического состояния энергетического оборудования и контроль технологических процессов, протекающих в нем, осуществляется путем измерения. На измерительный эксперимент, на который оказывает влияние множество факторов: неточности средств измерения, выбранный метод и методика измерений, отличия внешних условий, в которых производится измерение, от установленных, а также множество других причин. Поэтому результат измерения отягощен погрешностью. Любой результат измерения должен сопровождаться указанием его погрешности.

Погрешности могут использоваться для следующих целей [2]:

- для оценки точности измерения;
- для приписывания погрешности измерениям, проводимым на контролируемом объекте по определенным методикам;
- для установления требований к точности измерений, проводимых на контролируемом объекте.

В первом случае говорят о результирующей погрешности проведенного измерения с применением конкретных средств и методик измерения и с учетом конкретных условий измерения. Результирующая погрешность может использоваться непосредственно для принятия соответствующего решения.

Во втором случае речь идет о нормируемой погрешности для каждого из возможных различных вариантов средств и ме-

тодик измерения, которые могут использоваться на контролируемом объекте в процессе эксплуатации. В том числе это погрешности измерительных каналов. Эти погрешности рассчитываются при проектировании объекта. В процессе эксплуатации они приписываются соответствующим результатам измерения.

В третьем случае рассматривают допускаемую погрешность измерения, независимо от того, каким бы методом и средствами измерения оно не производилось. Она гарантирует требуемое качество технологического процесса и обеспечивает оценку работоспособности оборудования.

В соответствии с назначением погрешности методы их расчета различаются.

**Результирующая погрешность** измерения рассчитывается для конкретных условий измерения и факторов, влияющих на результат измерения. Методы расчета этой погрешности хорошо известны и освещены в нормативной документации и научно-технической литературе [71].

**Нормированная погрешность** измерительного канала рассчитывается с учетом максимально-возможных погрешностей, составляющих его элементов, и с учетом всевозможных факторов, влияющих на результат измерения. Она должна учитывать, в том числе и погрешность используемого метода измерения

**Допустимая погрешность** должна соответствовать требованиям метрологическому обеспечению контролируемого объекта со стороны заказчика и назначается исходя из этих требований. Мотивировка назначения допустимой погрешности вызывает затруднения и выбор погрешности часто производят эвристическим путем или исходя из опыта эксплуатации. Из-за отсутствия необходимых методик за допустимую погрешность иногда принимают нормированную погрешность средств измерения. Предлагаемая монография посвящена методам оценки допускаемой погрешности.

В любом случае необходимо хорошо представлять физическую сущность составляющих погрешностей и способы их суммирования.

### 3.2. Классификация погрешностей измерения.

При проведении измерений из-за несовершенства измерительного эксперимента невозможно получить полностью свободный от искажений результат. Качественной характеристикой измерений является их точность. Количественной оценкой точности измерений является погрешность измерения. Она указывает возможные границы неопределенности значения измеряемой величины. Абсолютное значение погрешности измерения – это отклонение результата измерения  $x$  от истинного значения  $x_{и}$  физической величины. Размерность абсолютной погрешности совпадает с размерностью физической величины

$$\Delta x = x - x_{и} \quad (3.1)$$

Истинное значение физической величины – это значение, которое идеальным способом в качественном и количественном отношении отражает свойство объекта. К истинному значению приближается значение физической величины с повышением точности измерений. Оно всегда остается неизвестным, и вместо него для определения абсолютного значения погрешности на практике используют действительное значение  $x_{д}$ :

$$\Delta x = x - x_{д} \quad (3.2)$$

За действительное значение принимают значение физической величины, найденное экспериментальным путем, например, с помощью образцовых средств измерения и настолько приближающееся к истинному значению, что может быть использовано вместо него.

Для сравнения точности измерения разнородных физических величин, например, температуры и давления используется относительная погрешность измерения. Она определяется по

формуле (3.3) и имеет размерность процента от измеренной величины (ИВ)

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Характер проявления и причины возникновения погрешности весьма разнообразны, поэтому в практике измерений установилось деление погрешностей на ряд разновидностей, за каждой из которых закреплено определенное наименование. Этих наименований около 30. При метрологическом исследовании объекта измерения необходимо обоснование различных погрешностей. Для систематизации наименований используют классификацию погрешностей.

Основными составляющими результирующей погрешности измерения являются инструментальная и методическая погрешности, названные так в зависимости от причин их возникновения.

Инструментальными называются такие погрешности причинами, возникновения которых являются сами средства измерения. Они возникают из-за трения в узлах прибора, неточности изготовления деталей, неадекватной градуировки шкалы и т.д. Эти погрешности должны быть определены при испытаниях прибора и занесены в его паспорт.

Следует обратить внимание, что в паспорт прибора погрешность может быть занесена в абсолютной форме, в процентах от измеренного значения (ИВ), т.е. в относительной форме или в процентах от верхнего предела измерения (ВПИ) на шкале прибора, т.е. в приведенной форме. Приведенная погрешность определяется выражением

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_{\max}} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

В свою очередь инструментальная погрешность складывается из основной и дополнительной погрешности.

Основная погрешность – это погрешность средства измерения, возникающая при его использовании в так называем-



мых нормальных условиях, определенных ГОСТ (например, температура –  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ , атмосферное давление 0,1 МПа., отклонение напряжения питания  $\pm 5\%$  от нормального и т.д.). Изменения показаний прибора вследствие отклонения условий эксплуатации от нормальных вызываются дополнительной погрешностью. Сведения о дополнительных погрешностях так же приводятся в паспорте прибора. В них указываются коэффициенты влияния различных факторов на величину дополнительной погрешности. Например, для учета влияния температуры внешней среды дополнительная погрешность учитывается коэффициентом  $\psi_\theta$ , с размерностью  $(\%/10\text{K})$ . Тогда дополнительная относительная погрешность от изменения температуры определяется выражением

$$\delta_\theta = \psi_\theta \cdot \frac{\Delta\theta}{10} \quad (3.5)$$

где  $\Delta\theta$  – отклонение температуры от нормальных условий.

Как основная, так и дополнительная погрешности могут быть аддитивными и мультипликативными. При чисто мультипликативной погрешности абсолютная погрешность  $\Delta x$  возрастает прямо пропорционально текущему значению измеряемой величины. При чисто аддитивной погрешности она остается неизменной и равной абсолютной погрешности нуля. При одновременном присутствии как аддитивной, так и мультипликативной составляющих текущее значение абсолютной погрешности в функции от измеряемой величины описывается соотношением

$$\Delta x = \Delta x_0 + \gamma_s \cdot x \quad (3.6)$$

где  $\Delta x_0$  - аддитивная составляющая погрешности,  
 $\gamma_s \cdot x$  - мультипликативная составляющая погрешности.

Суммарная инструментальная погрешность называется эксплуатационной и в относительном виде определяется формулой

$$\delta_{\text{и}}^2 = \delta_0^2 + \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad (3.7)$$

где  $n$  – число влияющих факторов.

При метрологическом обосновании применения тех или иных средств измерения необходимо учитывать характер изменения инструментальной погрешности в диапазоне измерения. Требования по метрологическому обеспечению должны удовлетворяться при максимальной погрешности средства измерения.

Методическими погрешностями называются такие погрешности, которые связаны не с самим прибором, а с методом измерения. Они возникают из-за невозможности должной установки датчика, неадекватности математической модели объекта измерения, влияния средств измерения на объект измерения и др.

Из-за установки датчика методическая погрешность возникает, например, при измерении температурного поля по одной, двум точкам отбора измерительного сигнала или при измерении уровня рабочей жидкости в емкости при крене и дифференте корабля, если датчик установлен на краю емкости и т.д. Неадекватность математической модели объекта приводит к методической погрешности при измерениях электрических величин в цепях переменного тока при использовании ряда измерительных механизмов. Влияние средств измерения на объект вызывает методическую погрешность в том случае, если при измерениях изменяются характеристики объекта. Например, включение в электрическую цепь приборов, приводит к изменению сопротивления электрической цепи.

Таким образом, основной отличительной особенностью методических погрешностей является то обстоятельство, что они не могут быть указаны в паспорте прибора, а должны оцениваться на стадии проектирования при выборе методики из-

мерения. Поэтому здесь необходимо четко различать фактически измеряемую величину от физической величины, подлежащей измерению.

Такая оценка требует обстоятельного экспериментального метрологического исследования принятого метода измерения, в результате которого необходимо установить методическую погрешность и занести ее в паспорт метода.

При наличии как инструментальной так методической составляющей погрешности измерения их необходимо суммировать. При этом, как всегда, необходимо обращать внимание на размерность суммируемых погрешностей. Если методическая погрешность выражена в относительной форме  $\delta_m$ , а инструментальная погрешность – в приведенной форме  $\gamma_{и}$ , то относительная результирующая погрешность будет определяться выражением

$$\delta = \sqrt{\delta_m^2 + \gamma_{и}^2 \left( \frac{x_{\max}}{x} \right)^2} \quad (3.8)$$

Если при расчете результирующей погрешности не учитывать отношение максимального значения на шкале к измеренному значению, то окончательная оценка погрешности будет получена с грубейшей ошибкой.

По характеру проявления погрешности разделяются на случайные и систематические погрешности.

Случайными погрешностями называются такие, которые являются непредсказуемыми ни по знаку, ни по размеру и неизвестны по природе. Они появляются в результате совокупности причин, трудно поддающихся анализу. Присутствие случайных погрешностей легко обнаруживается при повторных измерениях в виде некоторого рассеивания получаемых результатов в серии. Таким образом, главной отличительной чертой случайных погрешностей является их непредсказуемость от одного отсчета к другому.

В основе теории погрешностей лежат две закономерности:

– при большом числе измерений случайные погрешности одинакового числового значения, но разного знака встречаются в равной мере часто;

– большие погрешности встречаются реже, чем малые.

В корабельных условиях показания приборов рассеиваются незначительно и при измерении параметров технологических процессов указатели приборов, как правило, устанавливаются в одно определенное положение. Это происходит по той причине, что погрешность средств измерения значительно превышает возможный разброс показаний случайного характера. В соответствии с ГОСТ 8.207–76 при основной погрешности прибора, в 8 раз превышающей среднеквадратическое отклонение значений параметра, случайной составляющей можно пренебречь и усредненный результат характеризовать только основной погрешностью прибора. Это и происходит на самом деле.

Этот факт еще раз подчеркивает важность метрологического обоснования необходимой точности измерения. При использовании чрезмерно точных приборов большую роль будут играть случайные погрешности, что приведет к значительным расхождениям измеренных значений, а при невысоком классе точности приборов могут быть упущены важные тенденции изменения параметра.

Систематическими называются погрешности, изменяющиеся под влиянием каких-либо определенных факторов, например, температуры окружающей среды, напряжения питания приборов и пр. Методические погрешности часто носят систематический характер. Часто отличительный признак систематической погрешности состоит в том, что они имеют постоянный знак (+ или –) и поэтому могут быть предсказаны и благодаря этому почти полностью устранены введением соответствующих поправок.

Причинами появления систематических погрешностей является неправильная градуировка средств измерения, неправильная установка начала отсчета, дополнительные погрешности, возникающие под влиянием определенных факторов (тем-

пературы, напряжения, частоты и т.д.), многие методические погрешности и пр.

Исключение систематической погрешности из результатов измерений рассматривается как исправление этих результатов. Оно осуществляется двумя способами:

1. Для аддитивных погрешностей – путем внесения поправок. В этом наиболее распространенном случае производится алгебраическое сложение результата измерения и поправки. Под поправкой понимают систематическую погрешность, взятую с обратным знаком.

2. Для мультипликативных погрешностей – путем использования поправочных множителей. Здесь результат измерения умножается на поправочный коэффициент, который может быть больше или меньше 1.

Случайные и систематические погрешности выявляются в процессе измерения путем анализа результатов измерения. До проведения измерения возможную погрешность оценивают по паспортным данным средств измерения, в которых указываются нормированные погрешности. Их относят к так называемым неисключенным систематическим погрешностям. В их число входят основная и дополнительные погрешности средств измерения. Эти погрешности определяются при испытаниях средств измерений в процессе их изготовления. Затем их нормируют с учетом старения приборов и увеличивают погрешности на (25-100)%.

Таким образом, анализ физической сущности составляющих погрешностей показывает, что для оценки точности измерения необходимо учитывать методическую и инструментальную погрешности, для учета влияющих факторов нужно различать основную и дополнительную погрешности, а для уменьшения погрешности измерений следует выявлять ее систематическую составляющую и вносить соответствующие поправки. Кроме того, для суммирования погрешностей важно различать относительные и приведенные погрешности, а также аддитивные и мультипликативные погрешности измерения, т.к. их сложение возможно только с учетом измеренного значения физической величины.

### 3.3. Методы суммирования погрешностей результата измерения

Задача суммирования погрешностей требует учета всех составляющих погрешности и поэтому является достаточно сложной. Так, для определения погрешности измерения одного параметра одним прибором необходимо просуммировать все составляющие погрешности, включая основную и дополнительные. При создании измерительных каналов информационно-измерительных комплексов возникает задача суммирования погрешностей ряда измерительных преобразователей каждого канала (датчика, вторичного прибора, усилителя, нормирующего устройства и т.д.), образующих данный канал [18].

Суммирование погрешностей зависит от способа обработки результатов прямых, косвенных и совокупных измерений. При определении погрешностей прямых измерений к погрешностям используемых средств измерений должны быть добавлены методические погрешности, погрешности, допускающиеся при отсчете показаний. При оценке погрешностей косвенного измерения обобщенных показателей должен быть учтен сложный механизм трансформации погрешностей каждого из результатов прямых измерений в результирующую погрешность результата косвенного измерения. Наконец, при оценке состояния объекта измерения необходимо знать вклад погрешностей измерения всех параметров состояния.

#### 3.3.1. Прямые измерения.

При однократном измерении расчет случайной результирующей абсолютной погрешности  $\Delta_{рез}$  результата прямого измерения сводится к вычислению погрешности в начале диапазона измерения при  $x = 0$  и в конце диапазона измерения при  $x$

=  $x_{\max}$ . Это связано с тем, что среди составляющих погрешностей могут быть как аддитивные, так и мультипликативные погрешности. В начале диапазона измерения мультипликативные погрешности равны нулю и поэтому учитываются только аддитивные погрешности. В конце диапазона следует учитывать те и другие составляющие.

Суммировать погрешности можно двумя способами: геометрически или алгебраически. При геометрическом способе складываются квадраты погрешностей, чтобы исключить влияние знака погрешности. При алгебраическом способе погрешности складываются с учетом своего знака. Выбор метода суммирования зависит от того, являются ли суммируемые погрешности коррелированными или независимыми. Коррелированные погрешности складываются алгебраически, а независимые погрешности – геометрически.

В связи с большими трудностями определения коэффициента корреляции для упрощения расчетов целесообразно ограничиться разделением погрешностей со слабой и сильной корреляцией. Условной границей между слабой и сильной корреляцией можно считать  $r = 0,7$  [18]. При  $r > 0,7$  корреляция считается сильной и принимается  $r = 1$ , а при  $r < 0,7$  – слабая корреляция и принимают, что  $r = 0$ . Например, коррелированными являются те погрешности, которые вызваны одними и теми же причинами. Дополнительные погрешности, возникающие от влияния напряжения и частоты тока, потребляемого прибором, следует считать жестко коррелированными и для них  $r = 1$ , т.е.

$$\Delta_{рез} = \Delta_u \pm \Delta_f \quad (3.9)$$

Основную  $\Delta_o$ , дополнительную  $\Delta_d$  и методическую  $\Delta_m$  погрешности, а также погрешность считывания  $\Delta_c$ , можно считать независимыми, поэтому  $r = 0$ . Следовательно, они суммируются геометрически.

$$\Delta_{рез} = \sqrt{\Delta_o^2 + \Delta_d^2 + \Delta_m^2 + \Delta_c^2} \quad (3.10)$$

Для алгебраического суммирования коррелированных

погрешностей необходимо установить их знаки. Положительное или отрицательное значение погрешности от влияющих факторов можно установить по паспорту средств измерения. Для методической погрешности ее знак устанавливается путем экспериментального метрологического исследования и должен быть указан в паспорте метода.

Следует помнить, что при суммировании случайных составляющих погрешности расчетным путем все погрешности должны быть приведены к средне-квадратической погрешности  $\sigma$ . В то же время в паспорте или в другой нормативной документации приводятся данные о максимальной предельно-допустимой погрешности  $\Delta_T$ . Их необходимо перевести в случайные погрешности, а затем суммировать. Перевод в случайные погрешности осуществляется с использованием формулы

$$\Delta_T = k\sigma \quad (3.11)$$

с помощью коэффициентов вида распределения  $k$ , значения которых зависят от принятого закона распределения и доверительной вероятности [18, 71].

Таким образом, практические правила расчетного суммирования составляющих результирующей погрешности прямого измерения сводится к следующему.

1. Исходными данными для расчета должны служить оценки всех отдельных составляющих погрешности, взятых из паспорта прибора и аттестованного паспорта метода.

2. Для оценки результирующей погрешности должны учитываться корреляционные связи различных составляющих погрешности.

3. Сильно коррелированные составляющие складываются алгебраически с учетом знака, слабо коррелированные – геометрически.

4. Все составляющие подразделяются на аддитивные и мультипликативные и суммируются отдельно.



5. Систематические погрешности исключаются из суммирования и учитываются путем внесения поправок в результат измерения.

6. После того, как группа сильно коррелированных погрешностей выделена, внутри ее производится алгебраическое суммирование, суммарное значение по группе и оставшиеся некоррелированные погрешности считаются независимыми и складываются квадратами, т.е. геометрически.

7. В начале диапазона измерения складываются только аддитивные составляющие, а в конце диапазона – все аддитивные и мультипликативные составляющие.

Изложенные правила суммирования погрешностей являются простыми, но практическое выполнение подобных расчетов требует сбора большого количества исходных данных принятия решений эвристического характера для каждого конкретного случая.

*Пример. Пусть требуется рассчитать результирующую погрешность измерительного канала, состоящего из датчика, усилителя и цифрового вольтметра. Вид измеряемой физической величины зависит от типа датчика.*

Условия измерения.

*Температура в помещении, где находится датчик может лежать в пределах от 5°C до 30°C, а в помещении, где находится усилитель и вольтметр, - в пределах от 18°C до 24°C. Напряжение, питающее аппаратуру, может колебаться в пределах  $\pm 15\%$ .*

Исходные данные.

*Основная погрешность датчика нормирована в паспорте приведенной погрешностью  $\gamma_d = 0,15\%$ . Здесь и далее в этом примере указывается % от ВПИ.*

*Основная приведенная погрешность усилителя равна  $\gamma_y = 0,05\%$ .*

*Основная погрешность цифрового вольтметра (аналого-цифрового преобразователя АЦП) нормируется двучленной формулой  $c/d = 0,2/0,1$ .*

Температурная погрешность датчика характеризуется температурным коэффициентом  $\psi_{\theta} = +4\%/10\text{К}$ .

Температурная погрешность усилителя характеризуется температурным коэффициентом  $\psi_{\theta} = \pm 0,2\%/10\text{К}$ .

Максимальная погрешность датчика от колебаний напряжения нормируется погрешностью  $\gamma_{дU} = 0,6\%$ .

Максимальная погрешность усилителя от колебаний напряжения нормируется погрешностью  $\gamma_{yU} = 0,45\%$ .

Расчет составляющих погрешности.

**Основная погрешность датчика** предполагается аддитивной. Она одинакова во всем диапазоне измерения и равна  $\gamma_{д} = 0,15\%$ . Для нахождения среднеквадратических отклонений (с.к.о.) необходимо знание вида закона распределения погрешностей. Если он неизвестен априори, то его вид предполагается исходя из устройства измерительного преобразователя. Для рассматриваемого реостатного датчика можно предположить, что закон распределения является равномерным. При обеспечении доверительной вероятности 0,9 коэффициент вида распределения для него равен  $k = 1,73$  [71]. Тогда нормированную погрешность  $\gamma_{д} = 0,15\%$  можно считать половиной этого равномерного распределения и найти с.к.о. по формуле

$$\sigma_{д} = \gamma_{д} / 1,73 = 0,087\%$$

Необходимо иметь в виду, что размерность с.к.о. здесь определяется в % от верхнего предела измерения.

**Основная погрешность усилителя** также предполагается аддитивной, вид закона распределения тоже равномерный и с.к.о. для усилителя находится таким же образом. Оно равно  $\sigma_{y} = 0,029\%$ .

**Основная погрешность цифрового вольтметра (АЦП)** является мультипликативной, т.к. нормируется отношением  $s/d = 0,2/0,1$ . Оно означает, что приведенное значение основной погрешности цифрового вольтметра равно 0,1% при  $x=0$  и линейно возрастает до 0,2% в конце шкалы. Но при использо-

вании этих средств измерения характерной является следующая ситуация: максимальный сигнал от датчика, как правило, существенно меньше предела измерения АЦП. Пусть в данном примере сигнал от датчика после усилителя равен  $X_k = 200$  мВ, а предел измерения АЦП –  $X_{кВ} = 1000$  мВ. В этом случае нормированную погрешность цифрового вольтметра следует пересчитать.

Для пересчета необходимо определить абсолютную погрешность измерения в начале и в конце диапазона. Затем эти погрешности относят к новому пределу измерения.

При  $x = 0$

$$\Delta_{0В} = \frac{d}{100} X_{кВ} = 1\text{мВ}$$

$$\gamma_{0В} = \frac{\Delta_0}{200} 100 = 0,5\%$$

при  $x = 200$

$$\Delta_{200В} = \Delta_0 + \frac{c-d}{100} 200 = 1,2\text{мВ}$$

$$\gamma_{200В} = \frac{\Delta_0}{200} 100 = 0,6\%$$

После произведенного пересчета нормированной погрешности находится с.к.о. Известно [71], что закон распределения АЦП, обеспечивающих высокую точность, можно считать экспоненциальным с коэффициентом вида распределения  $k = 1,35$ . Исходя из этого, находится с.к.о.

$$\sigma_{0В} = 0,5 / 1,35 = 0,37\% \quad \sigma_{200В} = 0,44\%$$

Отклонение условий измерения от нормальных приводит в появлении дополнительных погрешностей.

**Температурная погрешность датчика** характеризуется температурным коэффициентом  $\psi_\theta = +4\%/10\text{К}$ . Знак + указывает, что эта погрешность является систематической. Она должна быть исключена путем введения поправки в результат измерения с обратным знаком и поэтому в дальнейшем она не учитывается.

**Температурная погрешность усилителя** является аддитивной, а закон распределения повторяет закон распределения температуры в помещении, где установлен усилитель и цифровой прибор. Ввиду того, что температура изменяется незначительно от 18°C до 24°C, то закон распределения можно считать равномерным с размахом  $\pm 3$ . При этом условии находится предельно-допустимая приведенная погрешность  $\gamma_{y\theta} = 0,2\% / 10\text{K} = 0,2 \cdot \frac{3}{10} = 0,06\%$ , а с.к.о. равно  $\sigma_{y\theta} = 0,034\%$ .

**Температурная погрешность вольтметра** отсутствует.

**Погрешность датчика от колебаний напряжения** является чисто мультипликативной и распределена по тому же закону, что и отклонение напряжения в сети от своего номинального значения. Считается [71], что распределение напряжения в сети подчиняется треугольному закону и коэффициент вида закона распределения равен  $k = 2,45$ . Отсюда с.к.о. равно  $\sigma_{dU} = 0,245\%$ .

**Погрешность усилителя от колебаний напряжения** также является мультипликативной и распределена по треугольному закону. Отсюда  $\sigma_{yU} = 0,184\%$ .

**Погрешность вольтметра от колебаний напряжения отсутствует.**

Таким образом, произведен расчет всех составляющих с.к.о. результирующей погрешности и они разделены на аддитивные и мультипликативные.

Суммирование составляющих результирующей погрешности.

Расчет результирующей погрешности измерительного канала сводится к вычислению приведенной погрешности в начале и в конце диапазона измерения. В начале диапазона складываются только аддитивные погрешности, а в конце диапазона складываются все составляющие погрешности.

Выбор метода суммирования (суммировать алгебраически или геометрически) зависит от того, являются ли суммируемые погрешности коррелированными или независимыми. В

приведенном примере коррелированными погрешностями являются погрешности датчика и усилителя от колебаний напряжения питания и должны суммироваться алгебраически. Остальные погрешности являются независимыми и суммируются геометрически. Погрешности датчика и усилителя от влияния температуры не являются коррелированными, т.к. они находятся в разных помещениях.

Для алгебраического суммирования коррелированных погрешностей необходимо установить их знаки. Для обоих преобразователей с увеличением напряжения погрешность увеличивается, поэтому эти погрешности должны просто складываться. Таким образом, результирующая погрешность равна:

**В начале диапазона измерения**

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{н рез}}^2 &= \sigma_{\text{д}}^2 + \sigma_{\text{у}}^2 + \sigma_{\text{В}}^2 + \sigma_{\text{у}\theta}^2 = \\ &= 0,087^2 + 0,029^2 + 0,37^2 + 0,034^2 = 0,146 \\ \sigma_{\text{н рез}} &= 0,4\%\end{aligned}$$

**В конце диапазона измерения**

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{к рез}}^2 &= \sigma_{\text{д}}^2 + \sigma_{\text{у}}^2 + \sigma_{\text{В}}^2 + \sigma_{\text{у}\theta}^2 + (\sigma_{\text{дU}} + \sigma_{\text{уU}})^2 = \\ &= 0,087^2 + 0,029^2 + 0,44^2 + 0,034^2 + (0,245 + 0,184)^2 = \\ &= 0,387 \\ \sigma_{\text{к рез}} &= 0,6\%\end{aligned}$$

**При произвольном значении измеряемой величины  $x$**

$$\sigma_{\text{рез}} = 0,4 + 1,0x / X_{\text{к}} \% \text{ от ВПИ.}$$

Для перехода к предельной приведенной погрешности необходимо учесть вид суммарного закона распределения. Согласно центральной предельной теореме теории вероятностей [22] в результате суммирования бесконечно большого числа близких по значению погрешностей закон распределения является нормальным. Допустим, что в данном примере суммарный закон распределения нормальный. Для нормального закона распределения коэффициент вида распределения равен

$k = 2,066$ . Учитывая это, получим приведенную результирующую погрешность канала измерения  $\gamma(x) = 0,8 + 2,0x / X_k$ .

Нормированная погрешность канала измерения  $\gamma_n$  должна быть увеличена не менее, чем на 25% с запасом на старение. Поэтому она должна быть равна

$$\gamma_{\text{норм}} = 1 + 2,5x / X_k$$

### 3.3.2. Косвенные измерения.

Оценка погрешности косвенного измерения производится суммированием погрешностей прямого измерения, но с определенным вкладом каждой погрешности.

Путем косвенного измерения определяются обобщенные показатели  $y$ , характеризующие качество и эффективность сложной технической системы или отдельных ее элементов. Значения измеряемого показателя определяются расчетом с использованием заранее известной функции (3.12) при значениях измеренных прямым способом величин  $x_i$  ( $i = 1, n$ )

$$y = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (3.12)$$

Задача расчета погрешности  $\Delta y$  результата  $y$  косвенного измерения сводится к суммированию всех  $n$  погрешностей  $\Delta_i$  измерения величин  $x_i$  ( $i = 1, n$ ) с учетом вклада отдельных погрешностей в результирующую погрешность. Этот вклад может быть различным в зависимости от вида функции (3.12) и соотношения между собой значений ее независимых переменных  $x_i$ .

Размер вклада отдельных погрешностей в результат измерения в зависимости от вида функции (3.12) определяется с помощью частных производных

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial [f(x_1, \dots, x_n)]}{\partial x_i} \quad (3.13)$$

Значения частных производных рассматриваются как веса, с которыми в суммарную погрешность косвенного измерения  $\Delta y$  входят все составляющие погрешности измерения каждой из измеренных величин  $x_i$ . Отсюда каждая  $i$ -тая составляющая абсолютной погрешности  $\Delta_i(y)$ , зависящая от вида функции (3.12) и абсолютной погрешности  $\Delta(x_i)$ , будет равна

$$\Delta_i(y) = \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta(x_i) \quad (3.14)$$

Кроме того, в зависимости от статистической связи между отдельными погрешностями  $\Delta(x_i)$  и  $\Delta(x_k)$  размер вклада в результат измерения учитывается коэффициентом корреляции  $r_{ik}$ .

В общем случае оценку точности косвенных измерений осуществляют по формуле для абсолютной погрешности

$$\Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \Delta x_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial y_i}{\partial x_k} \right) \cdot r_{ik} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta x_k \quad (3.15)$$

Здесь:

$\Delta x_i$  – погрешность результата непосредственного измерения параметра;

$\frac{\partial y}{\partial x_i}$  – весовой коэффициент составляющей погрешности

в суммарной погрешности  $\Delta y$ ;

$r_{ik}$  – коэффициент парной корреляции между погрешностями измерения параметров  $x_i$  и  $x_k$ .

В относительной форме погрешность косвенного измерения можно оценить по формуле

$$\delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_{iH}}{y_H} \right)^2 \cdot \delta x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_{iH}}{y_H} \right) \cdot r_{ik} \cdot \delta x_i \cdot \delta x_k} \quad (3.16)$$

Здесь коэффициенты чувствительности приведены к безразмерной форме, путем деления соответствующих дифференциалов по каждому из параметров на номинальные значения  $X_{iH}$  и  $y_H$ .

Как уже отмечалось в п. 3.2.1. коэффициенты корреляции  $r_{ik}$  практически трудно поддаются оценке. Поэтому для некоррелированных составляющих погрешностей  $\Delta x_i$  можно использовать выражение

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right)^2}, \quad (3.17)$$

а для коррелированных составляющих погрешностей результирующая погрешность косвенного измерения определяется как их алгебраическая сумма.

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i. \quad (3.18)$$

При метрологическом обосновании погрешности косвенного измерения можно, пользуясь выражениями (3.17) и (3.18), получить интервальную оценку для коррелированных и некоррелированных погрешностей.

Из формулы (3.18) следует ряд простых приближенных правил для оценивания погрешности результатов косвенного измерения.

1. Для суммы и разности  $y = x_1 \pm x_2$  абсолютная погрешность равна сумме абсолютных погрешностей прямого измерения



$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

2. Для произведения и частного  $y = x_1 \cdot x_2$  относительная погрешность равна сумме относительных погрешностей прямого измерения

$$\delta y = \delta x_1 + \delta x_2$$

3. При умножении измеряемой величины на константу  $y = K \cdot x$  относительная погрешность произведения равна произведению константы на относительную погрешность измеряемой величины

$$\delta y = |K| \cdot \delta x$$

4. При возведении в степень  $y = x^k$  относительная погрешность степени равна произведению показателя степени на относительную погрешность измеряемой величины

$$\delta y = k \cdot \delta x$$

При косвенных измерениях также может возникнуть методическая погрешность, равная, например, погрешности аппроксимации функции (3.12) по экспериментальным данным. В этом случае для получения результирующей погрешности косвенного измерения необходимо к погрешности, полученной по формуле (3.15), добавить путем геометрического сложения методическую погрешность косвенного измерения.

Пример. Пусть необходимо определить мощность, потребляемую потребителем электрической энергии в цепи постоянного тока. Известно, что она определяется, как функция напряжения и силы тока.

Измерение этих величин производится соответственно вольтметром и амперметром. Приборы размещаются в помещении и подвергаются воздействию внешних условий: вибрации, влажности и температуры. Следовательно, погрешности являются коррелированными величинами. При известных относительных инструментальных погрешностях приборов инструментальная погрешность косвенного измерения определяется по формуле (3.16). После подстановки частных производных в относительном виде получим

$$\delta P_{\text{и}} = \sqrt{\delta I^2 + \delta U^2 + r_{\text{IU}} \delta I \delta U}$$

Предположим, что потребляемая мощность, имеет большое значение, и для измерения силы тока используется шунт, на который также расходуется некоторая мощность. При измерении это приводит к методической погрешности измерения мощность  $\delta P_{\text{м}}$ . Она равна

$$\delta P_{\text{м}} = \frac{P_{\text{ш}}}{P} 100\%$$

Таким образом, погрешность косвенного измерения мощности равна

$$\delta P = \sqrt{\delta P_{\text{и}}^2 + \delta P_{\text{м}}^2}$$

### 3.4. Погрешность оценки состояния объекта измерения.

В настоящее время широко используется термин “состояние” объекта. Оно характеризуется несколькими различными физическими величинами и поэтому с точки зрения измерений его определение производится совместными измерениями. Однако вопрос о точности определения состояния остается открытым, т.к. в научно-технической литературе отсутствуют соответствующие рекомендации.

Для количественной оценки точности определения состояния воспользуемся выражением (2.27) для первой дифференциальной квадратичной формы, которая характеризует расстояние между двумя бесконечно близкими точками на некоторой линии гиперповерхности многомерного пространства.

Придадим каждой из этих двух точек следующий смысл. Пусть при измерении параметров объекта одна из них характеризует состояние контролируемого объекта, другая точка является оценкой истинного состояния. Если параметры, характе-

ризующие состояние, взаимосвязаны, то обе точки находятся на гиперповерхности многомерного пространства (см. п. 2.3). Вектор, соединяющий указанные точки на этой поверхности, является вектором погрешности оценки состояния. Естественно, что в большинстве практических случаев при достаточно точных измерениях обе точки находятся достаточно близко друг к другу, расстояние между ними является модулем вектора погрешности оценки состояния. Найдем выражение, связывающее погрешность оценки состояния контролируемого объекта с погрешностями измерения параметров, характеризующих это состояние.

Пусть в общем случае требуется оценить истинное состояние объекта, характеризуемого  $n$  физическими величинами  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . В нем происходят физические явления, удовлетворяющие  $h$  уравнениям вида (2.25)

$$f_j(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, h)$$

Пусть из  $n = h + m$  переменных, входящих в эти уравнения, выбраны  $m$  величин  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , измеряемых прямым способом для получения соответствующих оценок значений физических величин  $\hat{Q}_1, \hat{Q}_2, \dots, \hat{Q}_m$ . Эти числа являются значениями координат вектора, полностью характеризующего состояние объекта. Остальные  $h$  неизвестных  $y_1, y_2, \dots, y_h$  можно оценить косвенным путем по формулам, вытекающим из выражения (2.26).

$$\begin{aligned} y_1 &= \varphi_1(x_1, \dots, x_m) \\ y_2 &= \varphi_2(x_2, \dots, x_m) \\ &\dots\dots\dots \\ y_h &= \varphi_h(x_n, \dots, x_m) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Уравнения (3.19) образуют многообразие [19] в пространстве  $P$ .

Истинное состояние объекта контроля характеризуется вектором, значения координат которого равны  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ . Погрешности оценок  $\hat{Q}_1, \hat{Q}_2, \dots, \hat{Q}_m$ , определяются как

$$\Delta_1 = \hat{Q}_1 - Q_1, \Delta_2 = \hat{Q}_2 - Q_2 \dots, \Delta_m = \hat{Q}_m - Q_m,$$

и образуют вектор погрешностей.

$$\bar{\eta} = \|\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m\| \quad (3.20)$$

В геометрической интерпретации величина  $\bar{\eta}$  есть вектор в  $m$ -мерном пространстве, замыкающий векторы  $\hat{Q}$  и  $Q$ , который полностью принадлежит многообразию, определяемому  $h$  выражениями (3.19).

Найдем модуль  $\eta$  вектора погрешности оценки состояния через погрешности оценки величин, измеряемых прямым способом. Он равен расстоянию между истинным и измеренным положением точки в пространстве, которая характеризует состояние. Расстояние между двумя бесконечно близкими точками  $m$ -мерного пространства определяется первой дифференциальной квадратичной формой (2.27)

$$dS^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m G_{ik}(x_1, x_2, \dots, x_m) dx_i dx_k$$

где  $G_{ik}(x_1, x_2, \dots, x_m)$  – компоненты метрического тензора.

Предположим, что относительные случайные погрешности оценок величин  $\hat{Q}_i$  малы по сравнению с единицей, поэтому справедливо неравенство

$$\frac{\Delta_i}{\hat{Q}_i} \ll 1$$

Такое допущение является вполне правомерным только в достаточно малой окрестности точки  $M$  с координатами  $Q_1, \dots, Q_m$  [109]. В этой окрестности функции (3.19) можно разложить в ряд Тейлора и сохранить только члены первого порядка, а все члены более высокого порядка отбросить.

Тогда в выражении (2.27) дифференциалы величин можно заменить погрешностями измерения этих величин.

$$\eta^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m G_{ik} (x_1, x_2, \dots, x_m) \Delta_i \Delta_k \quad (3.21)$$

Запишем выражение (3.21) в развернутом виде

$$\begin{aligned} \eta^2 = & G_{11}\Delta_1^2 + G_{22}\Delta_2^2 + \dots + G_{mm}\Delta_m^2 + \\ & + 2G_{12}\Delta_1\Delta_2 + 2G_{13}\Delta_1\Delta_3 + \dots + 2G_{1m}\Delta_1\Delta_m + \\ & + 2G_{23}\Delta_2\Delta_3 + 2G_{24}\Delta_2\Delta_4 + \dots + 2G_{2m}\Delta_2\Delta_m + \\ & + \dots \dots + 2G_{(m-1)(m-2)}\Delta_{m-1}\Delta_{m-2} + \\ & + 2G_{(m-2)m}\Delta_{m-2}\Delta_m + 2G_{(m-1)m}\Delta_{m-1}\Delta_m \end{aligned}$$

Объединяя раздельно слагаемые при квадратах переменных и при их произведениях, получим следующее выражение:

$$\eta^2 = \sum_{i=1}^m G_{ii}\Delta_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m G_{ik}\Delta_i\Delta_k \quad (i \neq k) \quad (3.22)$$

Произведем  $l$  измерений величин  $x_i$  ( $l > m$ ) с погрешностью  $\Delta_{i\nu}$  ( $\nu = 1, \dots, l$ ) и с помощью выражения (3.22) вычислим  $l$  значений модулей погрешностей оценки состояния  $\eta_\nu$ .

Подставим полученные значения  $\eta_\nu$  и  $\Delta_{i\nu}$  в выражение (3.22) и произведем сложение соответствующих значений  $\eta_\nu$  и  $\Delta_{i\nu}$  находящихся в левой и правой частях выражения (3.22)

$$\sum_{\nu=1}^l \eta_\nu^2 = \sum_{i=1}^m G_{ii} \sum_{\nu=1}^l \Delta_{i\nu}^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m G_{ik} \sum_{\nu=1}^l \Delta_{i\nu} \Delta_{k\nu} \quad (i \neq k) \quad (3.23)$$

В полученном выражении (3.23)

$$\sum_{\nu=1}^l \eta_\nu^2 = \sigma^2 \quad - \text{дисперсия оценки состояния контролируе-}$$

мого объекта,

$$\sum_{\nu=1}^l \Delta_{i\nu}^2 = \sigma_i^2 \quad - \text{дисперсия оценки величины, измеряемой}$$

прямым способом,

$$\sum_{v=1}^1 \Delta_{iv} \Delta_{kv} = r_{ik} \sigma_i \sigma_k - \text{корреляционный момент случай-}$$

ных величин,

$r_{ik}$  – коэффициент корреляции этих случайных величин,

$G_{ij}$ ,  $G_{ik}$  – компоненты метрического тензора в координатах  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , соответственно при квадратах и при произведениях переменных.

С учетом указанных замен выражение (3.23) примет вид

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^m G_{ii} \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m G_{ik} r_{ik} \sigma_i \sigma_k \quad (3.24)$$

Выражение (3.24) является искомым выражением, устанавливающим связь между погрешностью оценки состояния физического явления в целом и погрешностями прямого измерения. При отсутствии статистической взаимосвязи между погрешностями измерения величин  $x_i$  и  $x_k$ , т.е. при  $r_{ik} = 0$ , выражение для погрешности оценки состояния значительно упрощается и принимает вид

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^m G_{ii} \sigma_i^2 . \quad (3.25)$$

Из формулы (3.25) следует, что квадрат погрешности оценки состояния равен сумме квадратов погрешностей прямого измерения с коэффициентами, равными соответствующим компонентам метрического тензора.

Установим связь формулы (3.24) с законом сложения погрешностей [12], определяющим погрешность косвенного измерения (3.15).

Для этого напишем выражения для компонент метрического тензора  $G_{ik}$ . Воспользуемся формулами (2.30 и 2.31), полученными в п. 2.3. Для удобства чтения повторим их. В координатах  $x_1, x_2, \dots, x_m$  компоненты при квадратах переменных равны

$$\begin{aligned}
G_{11} &= \left(\frac{\partial p_1}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_2}{\partial x_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial p_m}{\partial x_1}\right)^2 + \\
&+ \left(\frac{\partial p_{m+1}}{\partial x_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial p_n}{\partial x_1}\right)^2 \\
G_{22} &= \left(\frac{\partial p_1}{\partial x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_2}{\partial x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial p_m}{\partial x_2}\right)^2 + \\
&+ \left(\frac{\partial p_{m+1}}{\partial x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial p_n}{\partial x_2}\right)^2 \\
&\dots\dots\dots \\
G_{mm} &= \left(\frac{\partial p_1}{\partial x_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_2}{\partial x_m}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial p_m}{\partial x_m}\right)^2 + \\
&+ \left(\frac{\partial p_{m+1}}{\partial x_m}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial p_n}{\partial x_m}\right)^2
\end{aligned} \tag{3.26}$$

При произведениях переменных они равны

$$\begin{aligned}
G_{12} = G_{21} &= \frac{\partial p_1}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x_2} + \frac{\partial p_2}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x_2} + \dots + \\
&+ \frac{\partial p_n}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x_2} \\
G_{23} = G_{32} &= \frac{\partial p_1}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x_3} + \frac{\partial p_2}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x_3} + \dots + \\
&\frac{\partial p_n}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x_3} \\
G_{m-1m} = G_{mm-1} &= \frac{\partial p_1}{\partial x_{m-1}} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x_m} + \frac{\partial p_2}{\partial x_{m-1}} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x_m} + \dots + \\
&+ \frac{\partial p_n}{\partial x_{m-1}} \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x_m}
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Очевидно, что

$$\frac{\partial p_i}{\partial x_k} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = k \\ 0 & \text{при } i \neq k \quad (i, k = 1, \dots, m) \end{cases} \quad (3.28)$$

Тогда формулы (3.26) принимают более простой вид

$$\begin{aligned} G_{11} &= 1 + \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_1} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_1} \right)^2 \\ G_{22} &= 1 + \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_2} \right)^2 \\ &\dots\dots\dots \\ G_{mm} &= 1 + \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_m} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_m} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.29)$$

В свою очередь выражения для компонент метрического тензора при произведениях переменных упрощаются за счет исключения из них тех слагаемых, в которых один из сомножителей равен нулю в соответствии с (3.28)

$$\begin{aligned} G_{12} = G_{21} &= \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_1} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \right) + \dots + \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_1} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_2} \right) \\ G_{23} = G_{32} &= \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_3} \right) + \dots + \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_2} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_3} \right) \\ &\dots\dots\dots \\ G_{(m-1)m} = g_{m(m-1)} &= \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_{m-1}} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_m} \right) + \dots + \\ &+ \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_{m-1}} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_m} \right) \end{aligned} \quad (3.30)$$



Подставим выражения (3.29) и (3.30) для компонент метрического тензора в формулу (3.24). После некоторой перегруппировки переменных имеем:

при  $i \neq k$

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & \sum_{i=1}^m \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_k} \right) r_{ik} \sigma_i \sigma_k + \\ & + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial y_2}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y_2}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_2}{\partial x_k} \right) r_{ik} \sigma_i \sigma_k + \\ & + \dots + \\ & + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_h}{\partial x_k} \right) r_{ik} \sigma_i \sigma_k \end{aligned} \quad (3.31)$$

Слагаемые, выделенные в выражении (3.31), представляют собой не что иное, как дисперсию оценок  $\hat{Q}_{y_i}$  косвенного измерения величин  $y_i$  [12], которые связаны с величинами  $x_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ), измеряемыми прямыми способами, уравнениями (3.19). Выражение для дисперсии косвенного измерения и составляет закон сложения погрешностей [12]

$$\sigma_{y_i}^2 = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_i}{\partial x_k} \right) \cdot r_{ik} \sigma_i \sigma_k \quad (i \neq k) \quad (3.32)$$

Заменяя в выражении (3.31) соответствующие суммы на дисперсии оценки косвенного измерения (3.32) получим (3.33)

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^m \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^h \sigma_{y_i}^2 \quad (3.33)$$

Таким образом, дисперсия оценки состояния контролируемого объекта, в котором происходят физические явления, удовлетворяющие соотношениям (2.2), равна сумме дисперсий переменных величин, измеряемых прямым и косвенным спо-

собами. Формулы для оценки погрешности косвенного измерения (3.32) составляют лишь часть более общих выражений (3.24) и (3.33). Поэтому можно сказать, что последние полнее отражают закон сложения погрешностей.

Сопоставим три математических выражения (2.27), (3.24) и (3.33). Ввиду того, что последние два были получены из первой дифференциальной квадратичной формы (2.27), все три выражения тождественны друг другу.

Первое из них (2.27) определяет расстояние между двумя бесконечно близкими точками в  $n$ -мерном пространстве состояния по линии, лежащей на гиперповерхности, определяемой уравнениями (2.26). Оно дает хорошую геометрическую интерпретацию результатов измерения.

Второе выражение (3.24) позволяет определить погрешность оценки состояния объекта контроля через погрешности величин, измеряемых прямым способом. Оно дает математическую трактовку результата измерения и показывает, что функциональная зависимость между дисперсией состояния и среднеквадратическими отклонениями результатов прямого измерения является квадратичной формой.

Третье выражение (3.33) устанавливает связь между погрешностью оценки состояния и погрешностями оценки величин  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , характеризующих объект контроля. Из них  $m$  величин измеряются прямым способом и имеют дисперсии  $\sigma_1^2$ , а остальные  $h = n - m$  величин оцениваются косвенным путем и имеют дисперсию  $\sigma_{y_i}^2$ . Выражение (3.33) раскрывает метрологический аспект результата измерения состояния. Он заключается в том, что погрешность оценки состояния, определяемого совместными измерениями, складывается из погрешностей оценки величин, измеренных как прямым, так и косвенным путем.

Учитывая, что состояние сложного технического объекта характеризуется чаще всего неоднородными физическими величинами, имеющими различную размерность, расчет погрешности состояния целесообразно проводить в относительных

единицах. Для этого погрешность измерения  $\sigma_1, \dots, \sigma_n$  физических величин  $x_1, \dots, x_n$  необходимо использовать в относительной форме, а коэффициенты  $G_{ii}$  и  $G_{ik}$  следует привести к безразмерной форме путем умножения частных производных на отношения значений физических величин, измеренных прямым и косвенным путем.

$$G_{ii} = 1 + \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y_1} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial y_n}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y_n} \right)^2 \quad (3.34)$$

$$G_{ik} = \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y_1} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_1}{\partial x_k} \cdot \frac{x_k}{y_1} \right) + \dots + \left( \frac{\partial y_n}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y_n} \right) \cdot \left( \frac{\partial y_n}{\partial x_k} \cdot \frac{x_k}{y_n} \right) \quad (3.35)$$

Таким образом, погрешность оценки состояния определяется суммированием погрешностей прямого и косвенного состояния или суммированием погрешностей прямого измерения, но с определенным вкладом каждой из них, равным значениям компонент метрического тензора.

### 3.5. Выбор точности измерений.

Одним из важнейших направлений метрологического обеспечения является обоснование допустимой точности измерения. Погрешности являются основными характеристиками средств измерения. Они наиболее существенно влияют на качество измерений. При выборе средств измерения их рассматривают в первую очередь. Кроме того, проведение технических измерений предусматривает дальнейшее использование измерительной информации обслуживающим персоналом для принятия решения. Точность измерения должна быть такой, чтобы информация, полученная при измерении, было достаточно для

достижения цели измерения. Для оперативного контроля целью измерения является обеспечение качества функционирования оборудования, а для аварийного контроля – обеспечение его безопасности и надежности. Поэтому при выборе допустимой точности измерения необходимо сопоставлять возможности средств измерения с потребностью эксплуатационника.

Основные показатели точности измерения при метрологическом обеспечении опираются на нормируемую погрешность средства измерений  $\Delta_{\text{норм}}$ , которая определяет гарантированные границы средства измерения. Он служит для обеспечения единства измерений и является нормативным показателем средства измерения. Результирующая погрешность измерения  $\Delta_{\text{рез}}$  (см. п. 3.2) не должна превышать эту норму в процессе эксплуатации, которая, в свою очередь, должна удовлетворять требованиям метрологического обеспечения.

$$\Delta_{\text{рез}} < \Delta_{\text{норм}} \quad (3.36)$$

При выборе СИ нормативная погрешность средства измерения должна соответствовать требованиям метрологического обеспечения. Требования могут представляться абсолютной погрешностью  $\Delta$  (например: 5 °С ; 3,5 В ; 0,05 МПа), либо относительной погрешностью  $\delta$  (например: 1,0%; 2,5%).

Критериями выбора точности измерений для оперативного контроля являются:

- допустимое отклонение контролируемого параметра  $\Delta_{\text{д}}$  от номинального значения  $x_{\text{н}}$  ;
- коэффициент точности  $K_{\text{T}}$  .

Первый критерий - допустимое отклонение - служит для обеспечения эффективности функционирования контролируемого оборудования. В случае отклонения параметров на величину большую, чем  $\Delta_{\text{д}}$ , утрачиваются гарантированные разработчиком свойства объекта измерения.

Второй критерий – коэффициент точности – устанавливает связь между нормативной погрешностью средства измерений  $\Delta_{\Sigma}$ , с одной стороны, допустимым отклонением, с другой стороны

$$K_T = \frac{|\Delta_{\partial}|}{|\Delta_{\text{норм}}|} \quad (3.37)$$

Требуемое значение коэффициента точности берут из поверочных схем, стандартов или инструкций Госстандарта [78] и указывают в требованиях к метрологическому обеспечению. Во всех случаях значение коэффициента  $K_T$  выбирают из ряда положительных безразмерных чисел 2, 2,5, 3, 3,5, 4, 4,5, 5 и обосновывают свое решение.

Из соотношения (3.37) следует, что коэффициент точности является комплексным показателем и отражает требования, как со стороны метрологов, так и со стороны разработчиков изделия.

С нормативной погрешностью эти критерии связаны соотношениями:

$$\Delta_{\text{норм}} = \Delta_{\partial} \frac{1}{K_T} \quad (3.38)$$

$$\Delta_{\text{норм}} = \delta_{\text{норм}} \frac{x_H}{100} \quad (3.39)$$

$$\delta_{\text{норм}} = \frac{\Delta_{\partial}}{x_H} \frac{1}{K_T} 100 \quad (3.40)$$

Они позволяют по принятому разработчиком допустимому отклонению  $\Delta_{\partial}$ , по заданному в техническом задании коэффициенту точности  $K_T$  или показателю  $\delta_{\text{норм}}$  определить значение показателя  $\Delta_{\text{норм}}$  и тем самым обосновать выбор точности средства измерения.

Критериями выбора точности измерений для аварийного контроля являются:

– верхнее  $x_{\text{д}}^{\text{в}}$  или нижнее  $x_{\text{д}}^{\text{н}}$  допускные значения при одностороннем ограничении, или того и другого одновременно

при двухстороннем ограничении на значения параметра;

– коэффициент точности  $K_T$ .

Допускные значения параметра служат для обеспечения надежности оборудования и безопасности его эксплуатации.

Коэффициент точности при аварийном контроле определяется по формуле

$$K_T = \frac{x_D^B - x_D^H}{\Delta_{\text{норм}}} \quad (3.41)$$

Связь с нормируемой погрешностью устанавливается соотношениями

$$\Delta_{\text{норм}} = \frac{x_D^B - x_D^H}{2} \frac{1}{K_T} \quad (3.42)$$

$$\Delta_{\text{норм}} = \delta_{\text{норм}} \frac{x_D^B + x_D^H}{2 \cdot 100} \quad (3.43)$$

$$\delta_{\text{норм}} = \frac{(x_D^B - x_D^H)}{(x_D^B + x_D^H)} \frac{1}{K_T} 100 \quad (3.44)$$

Выражения (3.42) - (3.44) приведены для случая, когда на контролируемые параметры накладываются двухсторонние ограничения. Они отличаются от выражений (3.38) – (3.40), приведенных для расчета норм для оперативного контроля тем, что произведены замены

$$\Delta_D = \frac{x_D^B - x_D^H}{2} \quad x_H = \frac{x_D^H + x_D^B}{2}$$

При одностороннем допуске вместо отсутствующего допускового значения следует брать номинальное значение параметра.

Таким образом, обоснование выбора точности измерений заключается в расчете предела допустимой погрешности сред-

ства измерения (нормируемой погрешности  $\Delta_{норм}$ ) с учетом ограничений, накладываемых на значения параметров для обеспечения эффективности, надежности и безопасности оборудования. Расчетное значение, как правило, больше результирующей погрешности измерения и не должно превышать допустимого отклонения контролируемого параметра

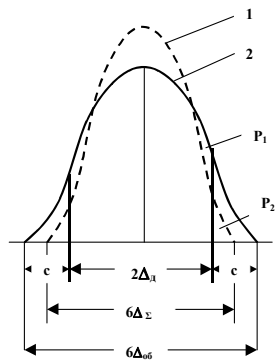
$$\Delta_{рез} < \Delta_{норм} < \Delta_{д} \quad (3.45)$$

В случае, если коэффициент точности  $K_T$  и предел допустимой относительной погрешности  $\delta_{норм}$  не указаны в требованиях, разработчику изделия рекомендуется обосновать или задать значения этих величин. Наиболее предпочтительным значением коэффициента точности считается  $K_T = 3$ , т.к. при этом контролируемый параметр измеряется с погрешностью в три раза меньшей, чем допустимое отклонение. Показатель  $\delta_{норм}$  должен быть не менее 5 % относительно допусковых значений параметра  $x_{д}^B$ .

С показателем точности измерения связаны и другие показатели метрологического обеспечения, такие, как вероятность ошибок при измерениях первого и второго рода и вероятность выхода значений контролируемого параметра за допуск, а отсюда и достоверность контроля. Эта связь обусловлена разбросом измеренных значений контролируемых параметров.

Причинами появления разброса результатов измерения являются: диффузность самого объекта измерения, характеризующая погрешностью  $\Delta_{об}$ , и рассеянность результирующей погрешности средства измерений  $\Delta_{рез}$ .

На рис. 3.1 представлены кривые плотностей распределения погрешности средства измерения и отклонений действительных значений параметров. Ограничения на контролируемый параметр представлены допуском, равным  $2 \Delta_{д}$ .



- 1 – плотность распределения погрешности средств измерения,
- 2 – плотность распределения рассеиваний действительных значений параметра,
- $P_1$  - вероятность ложного выявления отклонения параметра,
- $P_2$  - вероятность необнаруженного отклонения параметра,
- $C$  - вероятностный выход размера контролируемого параметра за допуск.

Рис. 3.1. Кривые плотностей распределения

Из рис. 3.1 видно, что от соотношения допуска  $2\Delta_d$ , разброса действительных значений контролируемых параметров, характеризуемых погрешностью  $\Delta_{об}$ , и предела допустимой погрешности средств измерения  $\Delta_{рез}$  зависят такие характеристики, как вероятность ложного выявления отклонения параметра  $P_1$ , вероятность необнаруженного отклонения параметра  $P_2$  и вероятностный выход текущего значения  $C$  контролируемого параметра. Вероятности  $P_1$  и  $P_2$  являются метрологическими характеристиками, с помощью которых выставляются требования к метрологическому обеспечению процессов контроля и диагностирования. Вероятность  $C$  характеризует возможность ухудшения качества функционирования оборудования. Коэффициент точности характеризует соотношение допустимого отклонения и предела допустимой погрешности средств измерения.

Таким образом, выбор точности измерения оказывает влияние на многие метрологические показатели. Поэтому для метрологического обеспечения необходимо обоснование как ограничений на отклонения текущего значения контролируемых параметров, так и выбора значения коэффициента точности. Для оперативного контроля эти ограничения характеризуются допустимыми отклонениями контролируемых параметров. Для аварийного контроля они равны их допусковым значениям.



Для обоснования этих величин необходимо исследование объекта измерения по следующим направлениям:

- оценка величины разброса значений параметров около среднего значения;
- оценка влияния отклонений параметров на показатели качества;
- выявление предельного состояния оборудования, для обоснования допусковых значений параметров.

Рассмотрим три случая возможных соотношений между рассеянностью погрешности средства измерений (кривые 1) и диффузностью объекта (кривые 2) на рис.3.2.

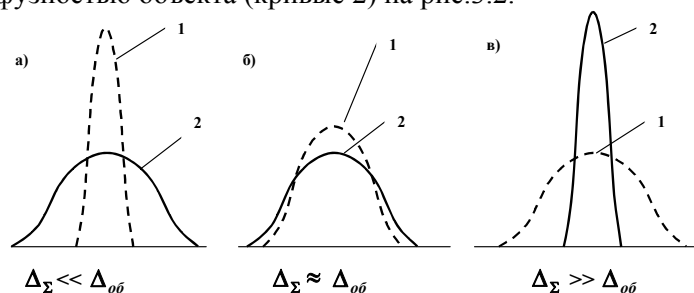


Рис. 3.2. Плотности распределения значений погрешности средств измерения и значений параметров объекта измерения.

1. При большой диффузности объекта измерения  $\Delta_{рез} \ll \Delta_{об}$  результирующий разброс результатов измерений оценивается погрешностью  $\Delta = \sqrt{\Delta_{рез}^2 + \Delta_{об}^2} \approx \Delta_{об}$ . Отсюда следует, что практически он связан только с рассеиванием **действительных** значений контролируемых параметров, т.е. с диффузностью самого объекта. Повышение точности средств измерений в этом случае не имеет смысла, и единственным путем повышения точности измерений является статистическая обработка многократных измерений.

2. При примерно равном разбросе  $\Delta_{рез} \approx \Delta_{об}$  результирующая погрешность  $\Delta = \sqrt{\Delta_{рез}^2 + \Delta_{об}^2} \approx 1,4\Delta_{об}$ , т.е. возрастает

тает всего на 40% по сравнению с предыдущим случаем. Здесь рациональным является как статистическая обработка результатов, так и повышение точности средств измерения. Причем повышение точности измерений является более предпочтительным, т.к. усреднение результатов не исключает систематических погрешностей.

3. При небольшой диффузности объекта измерения, например, при автоматизации процессов регулирования технологических процессов, результирующая погрешность определяется только погрешностью средств измерения. Очевидно, что, если анализируемый параметр необходимо включить в совокупность контролируемых параметров, то необходимо повышать точность его измерения.

Таким образом, анализ разброса значений параметров позволяет наметить способы повышения точности измерения: либо путем повышения точности средств измерения, либо путем статистической обработки результатов измерений.

Два других направления обоснования точности измерения связаны с анализом показателей качества и надежности контролируемого оборудования. Эти показатели должны находиться в определенных пределах в соответствии с техническим заданием. На изменение этих показателей оказывают влияние контролируемые параметры. Отклонение параметра от номинальных значений снижает качество функционирования контролируемого оборудования и его надежность.

Для ограничения этого влияния на показатели качества вводят допустимые отклонения  $\Delta_d$  параметров, а на показатели надежности – допусковые значения  $x_d^B$  и  $x_d^B$  (см. п. 2.4). Из проведенного анализа следует, что от их назначения зависит требуемая точность измерения, выбор предела допустимой погрешности средства измерения и другие метрологические показатели.

Методы нахождения для контролируемых параметров допустимых отклонений и допусковых значений рассмотрены в последующих разделах.

## **4. ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЦ ОБЛАСТИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ.**

Надежность оборудования главным образом зависит от того, насколько его техническое состояние отличается от предельного состояния, при котором дальнейшее его функционирование становится неэффективным или опасным при эксплуатации. О возможности перехода в предельное состояние обслуживающий персонал судит по величине отклонения от рабочего значения текущего значения параметра. При увеличении отклонения опасность перехода в предельное состояние повышается. Границами области работоспособности, разделяющими рабочее состояние оборудования от предельного состояния являются предельное и допускное значение контролируемого параметра (см. п. 2.4). Отсюда, обоснование границ работоспособности должно быть связано с требованиями к надежности оборудования.

### **4.1. Методы обоснования предельных значений параметров**

Требования к предельным значениям параметров вытекают из определения предельного состояния в соответствии с ГОСТ [16]. Они должны назначаться для обеспечения безопасности и эффективности использования оборудования, а также для сохранения его ремонтпригодности и долговечности. Исходя из перечисленных требований, формулируются критерии предельного состояния, с помощью которых производится оценка предельного значения. Если какой-либо узел или оборудование в целом находится под воздействием нескольких причин, способствующих переходу оборудования в предельное состояние, то необходимо выявить наиболее опасную причину.

Ей соответствует наименьшее предельное значение параметра (при условии:  $x_{пр} > x_n$ ).

Для выявления предельного состояния оборудования в настоящее время существуют определенные методы, с помощью которых и производится обоснование предельных значений параметров. Применение тех или иных методов зависит от внутренних и внешних процессов, вызывающих изменение параметра, от его влияния на качество функционирования оборудования или отдельного узла, от наличия или отсутствия экспериментальных данных или испытательных стендов и др. Приведем краткую характеристику основных методов.

#### 1. Метод испытаний.

Здесь предельное значение рабочей среды в механизме или аппарате, надежность или прочность оборудования определяются путем различного рода испытаний, например, гидравлических или воздушных испытаний. Технические средства испытываются в условиях высоких температур и давлений рабочих сред, существенно отличающихся от нормальных условий. Требования к испытаниям указываются в нормативных документах (ГОСТ, Нормали, Регистр и др.). Как правило, верхнюю границу испытаний рекомендуется определять с помощью коэффициента запаса. Значение коэффициента предлагается принимать в виде чисел 2, 1,5, 1.25 в зависимости от назначения испытываемого оборудования.

#### 2. Физико-технический метод.

Метод применяется для таких технических средств, в которых превышение какими-либо параметрами определенных значений приводит к началу необратимых физических или химических процессов в рабочем теле или в узлах и деталях изделий. Подобные процессы свидетельствуют о невозможности дальнейшей эксплуатации аварийного элемента установки.

В соответствии с этим методом предельными являются те значения параметров, при которых:

- происходит переход вещества рабочего тела или детали из одного физического состояния в другое, например плавление металла, вскипание жидкости и пр.;

– нарушается направление движения рабочего тела в технологическом процессе, например, давление нагнетания питательного насоса должно быть выше давления в парогенераторах;

– рабочие части механизмов не могут выполнять свои функции из-за большого трения или вязкости, например, при высокой температуре масла, топлива и пр.

### 3. Прочностной метод.

Метод основан на прочностных расчетах. В нем используются зависимости, связывающие контролируемые параметры с величинами, характеризующими прочность узлов и деталей механизмов и аппаратов. Он может быть применен для механизмов с вращающимися рабочими частями для определения предельной частоты вращения, а также для трубопроводов и аппаратов, которые можно представить в виде сосудов под давлением (паровых котлов, корпусов турбин и др.). При оценке предельных значений здесь также используются коэффициенты запаса на прочность, рекомендуемые в нормативных документах по расчетам на прочность.

### 4. Системный метод.

Здесь реализуется системный подход при анализе того или иного элемента сложной вышестоящей системы. Он учитывает влияние окружающей среды, а также самой системы на входящие в ее состав элементы.

Внешние условия оказывают большое влияние на параметры энергетической установки. При значительном повышении температуры воздуха и забортной воды многие параметры принимают значения, характерные для предельного состояния установки. Например, из-за недостаточного охлаждения увеличивается температура подшипников, падает вакуум в конденсаторе и т.д.

Влияние самой системы на параметры какого-либо элемента происходит, прежде всего, из-за выхода из строя части оборудования, или несоответствия их характеристик с необходимыми в определенной ситуации функциональными возможностями. Это происходит из-за глубокой взаимосвязи между элементами установки. Например, характеристики масляного

насоса оказывают влияние на механизмы, а характеристики охлаждающего насоса – на аппараты установки.

При анализе объекта измерения может оказаться возможным одновременное применение сразу двух и более методов. В этом случае за предельное значение следует принимать такое значение, которое является наиболее опасным или первоочередным для перехода объекта в предельное состояние.

В таблице 4.1. приведены причины перехода и критерии предельного состояния для различных элементов корабельных энергетических установок.

Таблица 4.1.

Элементы ЭУ, детали сборочных единиц	Характерные виды процессов, нагружения	Причины перехода в предельное состояние	Критерии предельного состояния
1	2	3	4
1. Валы, оси.	Изгиб, кручение, срез, циклическая нагрузка.	Усталостное разрушение, изнашивание.	Предел прочности на изгиб, на кручение, на выносливость, на жесткость.
2. Зубчатые передачи.	Изгиб зубьев, циклическая контактная нагрузка, трение качения с проскальзыванием.	Изнашивание с выкрашиванием, и отслаиванием, усталостное разрушение.	Предел прочности на изгиб, на контактные напряжения.
3. Подшипники скольжения.	Взаимное перемещение поверхностей при смазке, радиальная нагрузка.	Окислительное или абразивное изнашивание пар трения, усталостное изнашивание антифрикционного слоя.	Величина износа.
4. Винтовые пары, лопасти насосов.	Изгиб, кручение, взаимное перемещение рабочей среды вдоль поверхности.	Эрозионное изнашивание, усталостное разрушение.	Предел прочности на изгиб, на срез, на кручение.

1	2	3	4
5.Трудопроводы, сосуды.	Радиальная нагрузка на стенки, перемещение рабочей среды вдоль поверхности.	Эрозионное и коррозионное изнашивание.	Предел прочности на разрыв.
6.Проточная часть насосов, турбин.	Взаимное перемещение рабочей среды вдоль поверхности.	Эрозионное и коррозионное изнашивание, отложение солей.	Предельное уменьшение к.п.д.
7.Трубная система котлов, парогенераторов.	Взаимное перемещение рабочей среды вдоль поверхности нагрева, теплопередача, радиальная нагрузка на стенки труб, циклическая нагрузка.	Коррозионное изнашивание, отложение солей, золы, усталостное разрушение материалов из-за циклических нагрузок, перегрева, неравномерности нагрева.	Предел прочности на ползучесть при максимальных температурах, температура образования окислы, температура вскипания в экономайзере.
8.Шпоночное и шлицевое соединения.	Срез, циклическая и контактная нагрузка, взаимное скольжение поверхностей.	Пластическая деформация, усталостное разрушение, смятие материала.	Предел прочности на смятие, на срез.
9.Болтовые соединения.	Статические и динамические знакопеременные нагружения.	Пластическая деформация, усталостное разрушение, срез	Предел прочности на выносливость, на текучесть, на срез.
10.Пружины, гайки	Статические и динамические знакопеременные нагружения.	Потери упругости, усталостное разрушение.	Коэффициент упругости, предел прочности на выносливость.

#### 4.2. Методы обоснования допусковых значений параметров.

В научно-технической литературе и в технической документации часто используется термин “предельно-допускное” значение вместо предлагаемого “допускное” значение. Недостатком этого термина является его созвучие как с термином “предельное”, так и с термином “допускное” значение. В результате не всегда становится ясным, о чем идет речь.

Допусковое значение назначается с целью предупреждения обслуживающего персонала о возможном нарушении работоспособности оборудования [21]. Дальнейшее изменение параметра в опасную сторону нежелательно, более того, может произойти резкий переход в предельное состояние. Поэтому поддержание параметра в допустимой области обеспечивает безопасность и некоторый запас надежности.

Выбор допускового значения производится на основе предельного или номинального значения с некоторым запасом, который делает невозможным мгновенный переход оборудования в предельное состояние.

$$\begin{aligned}x_d &= x_{пр} - \Delta x \\x_d &= x_n + \Delta x\end{aligned}\tag{4.1}$$

Из опыта эксплуатации и проектирования известно, что этим способом повышается надежность оборудования, но без достаточного обоснования и без связи с показателями надежности.

Для диагностирования с помощью допусковых значений выделяют отдельные классы состояний: хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное, аварийное и др. При “хорошем” состоянии техническое обслуживание и ремонт не требуются. При “удовлетворительном” состоянии осуществляется контроль технического состояния, но с меньшей периодичностью. При “неудовлетворительном” состоянии проводится ремонт или осмотр неработоспособного оборудования. Наконец,



“аварийное” состояние требует немедленного вывода из действия оборудования. Здесь каждый класс выделяется с помощью своего конкретного допускового значения.

В настоящее время существуют следующие основные подходы для обоснованной рекомендации допускового значения контролируемого параметра:

- экспериментальный;
- статистический;
- вероятностный.

В первом случае проводятся планируемые эксперименты, в которых число измеряемых параметров превышает количество параметров, контролируемых в процессе эксплуатации оборудования. В состав дополнительно измеряемых параметров включаются структурные параметры и показатели физических полей. Их значения необходимы для проведения более глубокого анализа технического состояния. Все измерения выполняются более чувствительными средствами измерения с повышенным классом точности. По результатам эксперимента устанавливается связь допускового значения контролируемого параметра со значениями дополнительно измеренных параметров. Этот подход является главенствующим для вновь создаваемого оборудования, но недостатком его является необходимость достаточной экспериментальной базы для проведения опытов.

Во втором случае производится сбор информации о всевозможных отказах оборудования в процессе его эксплуатации с записью соответствующих значений параметров. Он осуществляется путем авторского надзора или специалистами по диагностированию данного типа оборудования. Затем производится статистическая обработка результатов замеров значений диагностических параметров, соответствующих определенным классам технического состояния. По результатам обработки назначаются допусковые значения контролируемых параметров. Этот подход необходимо применять для уже эксплуатируемого оборудования с целью корректировки ранее назначенных допусковых значений контролируемых параметров или при внедрении средств технического диагностирования. Недостатком

его является повышение затрат на эксплуатацию оборудования, но, как показывает практика, окупаемость дополнительных затрат происходит довольно быстро [17].

Вероятностный подход связывает допускное значение параметра с заданной вероятностью перехода технического состояния в предельное состояние. Эта вероятность назначается заказчиком оборудования. Достоинством этого подхода является возможность оценки допусковых значений уже на этапе проектирования, варьируя различными исходными данными. В сочетании с экспериментальным или статистическим подходом он позволяет существенно уменьшить объем необходимых экспериментальных исследований и, следовательно, уменьшить затраты на их проведение с одновременным повышением уверенности в его результатах.

#### **4.3. Надежность, вероятность и допускное значение контролируемого параметра**

Надежность энергетической установки является одним из важнейших свойств, которое необходимо обеспечить в процессе ее использования. Предельное состояние, как правило, наступает при постепенных отказах, которые иногда называют параметрическими. Они связаны с износом деталей, узлов, старением изоляционных материалов и другими причинами, при которых постепенно изменяются характерные для этих явлений параметры в сторону предельного значения. Среди характерных параметров всегда можно выделить некоторый критический параметр, который достигает предельного значения в первую очередь. Близость к предельному значению может наступить одновременно для двух и более параметров, тогда вероятность постепенного отказа распределяется на все параметры.

В настоящее время вероятность безотказной работы нормируется при создании образца военной техники, поэтому ориентировочное задание искомой вероятности не вызывает затруднений. Для установления связи между вероятностью и

допускным значением параметра воспользуемся моделью формирования постепенного отказа в фиксированный момент времени, полагая, что изменение параметра происходит очень медленно.

Пусть значения параметров анализируемого объекта изменяются в пределах рабочей области  $x_n \leq x \leq x_{пр}$  (см. рис. 2.3) под воздействием каких-либо из перечисленных выше причин и случайных воздействий. Для определенности предположим что вероятностное распределение значений параметра подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $M_x$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_x$ . В свою очередь под воздействием детерминированной составляющей величины  $M_x$  и  $\sigma_x$  могут принимать определенные значения в различных условиях эксплуатации, на различных этапах старения и износа и под воздействием управляющих и возмущающих воздействий.

На рис. 4.1.изображена плотность распределения значений критического параметра в области его возможного изменения. Сплошной линией показан закон распределения при математическом ожидании равном номинальному значению ( $M_x = x_n$ ), а пунктирной линией – при  $M_x = x_d$ . Разброс значений параметров зависит от среднеквадратического отклонения. Чем больше  $\sigma$ , тем больше могут отклоняться значения параметров от своего среднего значения.

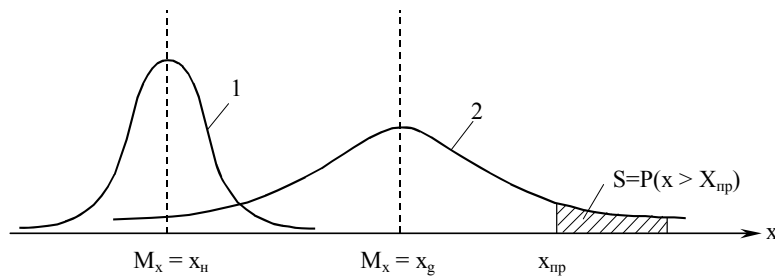


Рис. 4.1 Изменение плотности распределения значений параметров в процессе эксплуатации.

Для законов, изображенных на рисунке 4.1, принято, что  $\sigma_2 > \sigma_1$ .

Из рисунка видно, что вероятность выхода значения параметра за пределы  $x_d$  зависит как от  $M_x$ , так и от  $\sigma_x$ . В первом случае она практически равна нулю, а во втором случае она равна заштрихованной площади  $S$ . Для нормального закона распределения вероятность того, что в какой-то определенный момент времени значения параметра  $x$  превысят предельное значение  $x_{пр}$ , и наступит отказ равна:

$$Q(x \geq x_{пр}) = 1 - \Phi\left(\frac{x_{пр} - M_x}{\sigma}\right), \quad (4.2)$$

где  $\Phi\left(\frac{x - M_x}{\sigma}\right)$  – функция Лапласа,

$\tau = \frac{x_{пр} - M_x}{\sigma}$  – параметр функции Лапласа.

Если известна вероятность постепенного отказа  $Q(x > x_{пр})$  по параметру  $x$ , то вероятность нахождения параметра в области работоспособности можно найти по формуле

$$P(x \leq x_{пр}) = (1 - Q(x \geq x_{пр})) \quad (4.3)$$

С помощью формул (4.2) и (4.3) можно определить вероятность нахождения параметра в области работоспособности при любом смещении среднего текущего значения параметра  $M_x = x$  в пределах анализируемой области  $x_n < x < x_{пр}$ . На рис 4.2 представлена функция надежности, иллюстрирующая изменение значения искомой вероятности от 1 до 0,5 при смещении среднего текущего значения параметра. Причем при определенном значении  $x_k = x_d$  начинается резкое снижение вероятности. Значение контролируемого параметра  $x_k$ , при котором вероятность нахождения параметра в области работоспособности равна заданному значению  $P_{зад}$ , целесообразно принять за допускное значение параметра  $x_d$ .

На основе использования модели постепенного отказа предложен метод обоснования допускных значений параметров. Его можно применять, по крайней мере, для оценочных расчетов при следующих условиях:

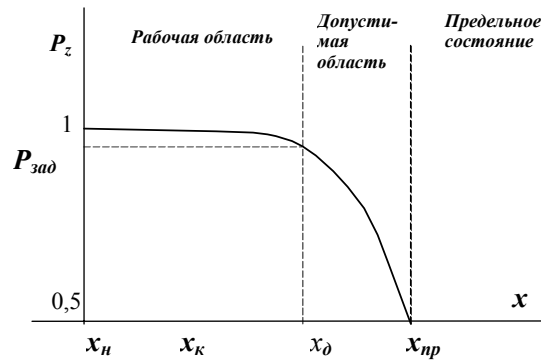


Рис. 4.2. Функция надежности

- значение параметра  $x$  является случайным;
- известен закон распределения значений параметра;
- известны параметры закона распределения.

Рассмотрим более подробно перечисленные условия.

Изменения параметров, отражающих состояние энергетической установки, в основном носят детерминированный характер. Они изменяются по законам, свойственным анализируемым технологическим процессам, под влиянием сопутствующих факторов, при старении и износе оборудования и т.д. Для компенсации этих изменений обслуживающий персонал вводит управляющие воздействия. Но одновременно на параметры воздействует и множество других факторов, таких как неточность управления, влияние окружающей среды, погрешность измерений и пр. Подобные воздействия придают изменениям параметров случайный характер. Исследования показывают [1], что среднеквадратическое отклонение для параметров энергетической установки лежит в очень широких пределах  $\sigma = (5 \div 30)\%$ .

Закон распределения значений параметров как случайной величины с трудом поддается определению, как правило, из-за отсутствия статистических данных. При их наличии и

современном развитии информационно-вычислительной техники соответствующие расчеты для оценки параметров закона распределения не являются проблемой. При отсутствии необходимых статистических данных ориентировочные расчеты можно проводить исходя из следующих соображений.

1. Для значений параметров наиболее распространенными являются нормальный, треугольный и равномерный законы распределения. Нормальный закон является наиболее распространенным при измерениях. Поэтому его можно принять в качестве основного. При ограничениях на изменения параметра справа и слева можно принять треугольный закон распределения. При отсутствии каких-либо сведений целесообразно принять равновероятный закон распределения. Методическая погрешность в расчетах от неправильного выбора закона распределения лежит в пределах  $(10 \div 30)\%$ .

2. Назначение допускового значения связано с требованием к надежности изделия. Для ее обеспечения в процессе использования главным является предотвращение постепенного отказа. Расчеты показывают, что для выдерживания некоторого запаса необходимо придерживаться следующих условий. При низких требованиях к надежности ( $P_{зад} < 0,914$ ) следует пользоваться равномерным законом, при требованиях лежащих в пределах  $(0,914 \leq P_{зад} < 0,962)$  – треугольным законом, а при  $P_{зад} \geq 0,962$  лучше использовать нормальный закон распределения значений параметров. При выполнении этих условий вероятность появления постепенного отказа при достижении параметром допускового значения будет не меньше заданного значения.

3. Параметром закона распределения, влияющим на выбор допускового значения, является среднеквадратическое отклонение. Для обеспечения надежности близость допускового значения к предельному значению должна быть тем меньше, чем выше среднеквадратическое отклонение. При отсутствии статистических данных его ориентировочное значение можно принять одним из двух следующих способов в зависимости от характера случайных воздействий на значения анализируемого параметра.

Сущность первого способа заключается в использовании “правила  $3\sigma$ ”. В соответствии с ним при известных максимальных  $x_{\max}$  и минимальных  $x_{\min}$  значениях случайной величины среднеквадратическое отклонение равно

$$\sigma = (x_{\max} - x_{\min}) / 6 \quad (4.4)$$

Сущность второго способа заключается в использовании интервала неопределенности значения параметра при измерении его с помощью прибора, имеющего класс точности  $\Delta$ . Если класс точности выражен в процентах от верхнего предела шкалы  $x_{\text{вни}}$ , то интервал неопределенности равен

$$\Delta x = \pm \Delta \cdot x_{\text{вни}} / 100.$$

С помощью этого интервала можно вычислить среднеквадратическое отклонение, используя соотношение

$$\sigma = \Delta x / \kappa \quad (4.5)$$

где  $\kappa = 2,066$  – для нормального закона распределения,

$\kappa = 2,02$  – для треугольного закона распределения,

$\kappa = 1,73$  – для равномерного закона распределения.

Использование второго способа для оценки среднеквадратического отклонения правомерно в том случае, когда диффузность объекта измерения очень мала, т.е. влияние случайных факторов на технологический процесс практически исключено. Действительное значение параметра зависит только от погрешности контрольно-измерительного устройства.

Таким образом, использование модели постепенного отказа позволяет по заданной вероятности постепенного отказа обосновать допускное значение контролируемого параметра. Последовательность операций при его назначении состоит в следующем:

1. Выявляются предельные состояния объекта измерения, и определяются критерии предельного состояния.
2. Из совокупности критериев выбирается наиболее опасное состояние на основе соответствующего критерия.
3. Одним из рассмотренных выше способов находится предельное значение параметра.
4. Из расчетов по надежности изделия задается допускное значение вероятности постепенного отказа.

5. Производится анализ значений параметров с целью выявления влияния на них случайных факторов. При наличии статистических данных параметру как случайной величине присваивается закон распределения и определяется среднеквадратическое отклонение. При отсутствии необходимых данных параметру присваивается наиболее опасный закон распределения в соответствии с изложенными выше рекомендациями по заданному допустимому значению вероятности. Среднеквадратическое отклонение оценивается одним из рассмотренных способов.

6. По заданной вероятности и закону распределения находится параметр закона распределения, а по нему – допускное значение анализируемого параметра.

В целях уменьшения трудоемкости часто используют графоаналитические методы расчета с помощью номограмм. На рис.4.3 приведен образец номограммы для расчета допускного значения параметра при нормальном законе распределения. Номограмма состоит из 3 квадрантов. В первом находятся кривые, характеризующие закон распределения случайной величины, во втором – линии постоянных среднеквадратических отклонений, в третьем – линии постоянной ширины области работоспособности.

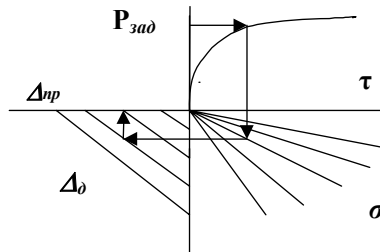


Рис. 4.3. Номограмма для выбора допускного значения параметра

Исходными данными для входа в диаграмму являются:

$P_{зад}$  – заданная вероятность нахождения параметра в области работоспособности;



$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;  
 $\Delta_{пр}$  – предельное отклонение параметра от номинального значения.

По этим данным находится допускное отклонение параметра от номинального значения.

С целью универсального использования номограммы для обоснованного назначения допускного значения любого параметра целесообразно исходные данные привести к относительному виду. Для этого необходимо абсолютные значения размерных величин разделить на максимальное (предельное) значение. Тогда и результат – допускное отклонение – также будет получен в относительном виде. На рисунке стрелкой показана последовательность операций. От заданной вероятности она идет к кривой, характеризующей закон распределения, а затем до пересечения с линией среднеквадратического отклонения. Далее стрелка идет до линии, соответствующей разнице предельного и номинального значений, и от нее стрелка идет к оси абсцисс. Здесь и находится искомый результат в виде относительной разницы между допускным и номинальным значениями.

*Примеры.*

*1. В экономайзере парового котла осуществляется подогрев питательной воды. Предельное состояние экономайзера парового котла наступает при вскипании в нем воды, в результате которого прогибаются трубки экономайзера, и он выходит из строя. Поэтому предельная температура воды после экономайзера равна температуре кипения, соответствующая давлению пара в нем. Однако чем выше температура воды после экономайзера, тем с большей эффективностью работает котел. Поэтому выгодно анализируемую температуру поддерживать как можно более высокой.*

*Определить значение температуры воды после экономайзера, чтобы не допустить ее вскипания. Предельное значение равно 250°C. При испытаниях экономайзера установлено, разброс значений температуры характеризуется среднеквадратическим отклонением, равным  $\sigma = 11^\circ\text{C}$ .*

Принимаем, что вероятность нахождения параметра в области работоспособности должна быть  $P(t \leq t_{np}) = 0,96$ . При известной вероятности находим параметр функции Лапласа по соответствующим таблицам [22].

$$\tau = \frac{t_{np} - M_x}{\sigma} = 1,7$$

Отсюда при  $t_{np}=250^\circ\text{C}$  и  $\sigma = 11^\circ\text{C}$  находим допускное значение температуры воды после экономайзера

$$t_\delta = M_x = 231^\circ\text{C}$$

Таким образом, вероятность того, что вода не вскипит в экономайзере, будет не меньше 0,96, если допускное значение температуры принять равным  $231^\circ\text{C}$ .

2. Определить допускное значение температуры воды, если ее предельное значение ограничивается температурой кипения воды при давлении 15,5 МПа и равно  $343^\circ\text{C}$ . Минимальное значение температуры в соответствии с технологическим процессом должно быть не менее  $298^\circ\text{C}$ . Значение среднеквадратического отклонения неизвестно.

Пользуясь первым способом определения среднеквадратического отклонения, находим, что  $\sigma = 7,5^\circ\text{C}$ . Из условия обеспечения надежности протекания процесса принимаем вероятность нахождения параметра в области работоспособности  $P(t \leq t_{np}) = 0,997$ . По таблице функции Лапласа находится ее параметр

$$\tau = (t_{np} - M_t / \sigma) = 2,56$$

Отсюда находим, что  $M_t = 324^\circ\text{C}$ . Следовательно, и допускное значение должно быть равно  $t_\delta = 324^\circ\text{C}$ . Таким образом, запас до наступления предельного значения равен около  $20^\circ\text{C}$ .

3. Предельное значение давление в емкости равно  $p_{np} = 15\text{ МПа}$ . Для того, чтобы давление не превышало указанного значения, предусмотрено защитное устройство. Неточность измерения может привести к ложному срабатыванию защиты из-за того, что результат измерения находится в некоторой зоне неопределенности, ширина которой зависит от погрешности измерительного устройства. Необходимо опреде-

лить допускное значение параметра, при котором должна выполняться команда по защите оборудования с вероятностью ложного срабатывания 0,003.

Пусть основная погрешность измерительного устройства равна 2% от верхнего предела измерения, равного  $p_{\text{впл}} = 40$  МПа. Интервал неопределенности при измерении давления равен

$$\Delta p = \Delta \cdot p_{\text{впл}} / 100 = 0,8 \text{ МПа},$$

Среднеквадратическое отклонение значений параметра найдем вторым способом. При нормальном законе распределения оно достигает значения

$$\sigma = \Delta p / 2,066 \approx 0,4 \text{ МПа}.$$

Из постановки задачи следует, что вероятность  $P(p \leq p^{np}) = 0,997$ . При этом значении вероятности параметр функции Лапласа равен 2,56.

$$\tau = (p^{np} - M_p) / \sigma = 2,56$$

Отсюда следует, что при рассмотренном разбросе значений параметров защитное устройство обеспечит срабатывание системы защиты по давлению свыше 15 МПа с вероятностью 0,997 в том случае, если допускное значение давления будет равно 14 МПа.

#### **4.4. Анализ факторов, влияющих на оценку допускных значений параметров.**

Модель постепенного отказа позволяет установить взаимосвязь между надежностью изделия и границами области работоспособности параметров, характеризующих его функционирование. На оценку допускного значения параметра оказывают влияние следующие величины:

- вероятность нахождения параметра в области работоспособности;
- предельное значение параметра;
- отклонение рабочего значения от номинального значения;

– среднеквадратическое отклонение значений параметра от среднего.

Детальное исследование перечисленных величин позволяет более глубоко проанализировать причины возникновения опасных ситуаций, связанных с переходом за допустимые значения параметров, и на их роль в обеспечении эффективной и безопасной эксплуатации технических средств. Рассмотрим обстоятельства, которые оказывают влияние на эти величины, и характер их изменения в процессе эксплуатации.

Назначение предельного значения параметра необходимо, прежде всего, для предупреждения перехода оборудования в предельное состояние. Оно может возникнуть по разным причинам. Если в начальный период эксплуатации предельное состояние определялось, например, требованием к эффективности применения оборудования, то в период окончания выработки ресурса вполне возможно главным является безопасность обслуживающего персонала. Следовательно, и критерий выбора предельного значения должен быть другим.

Анализируя критерий выбора в общем плане, следует отметить, что на принятие решения о назначении предельного значения оказывают влияние многие причины. К ним можно отнести желание иметь высокие показатели эффективности, результаты ресурсных испытаний, неоднородность материала, применяемого для изготовления узлов и деталей и их износ, изменение свойств материала в эксплуатационных условиях, во многом случайный характер режимов использования оборудования и многое другое. Из анализа вытекает, что аргументы, влияющие на выбор предельного значения, подвержены изменению в процессе эксплуатации, и оно имеет как детерминированный, так и стохастический характер.

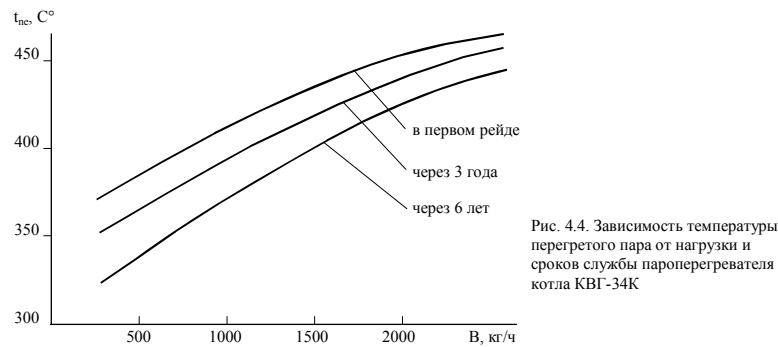
Детерминированные процессы, происходящие в оборудовании, вызваны старением и направлены в сторону повышения опасности его функционирования. Если скорость старения равна  $\gamma_{np}$ , то предельное значение за время  $\Delta T$  изменится в опасную сторону на величину  $\Delta x_{np} = \gamma_{np} \cdot \Delta T$ . Стохастическая составляющая процессов обусловлена различными условиями

испытаний, изготовления и эксплуатации технических средств. Она характеризуется среднеквадратическим отклонением  $\sigma_\gamma$ .

Например, коррозионные процессы утоняют стенки трубопроводов, корпусов и емкостей, уменьшают прочность оборудования и повышают опасность возникновения разрывов, течей, уменьшения количества рабочего тела, участвующего в технологическом процессе. В тоже время скорость коррозии зависит от условий плавания корабля и качества эксплуатации технических средств. Следовательно, она имеет существенную стохастическую составляющую.

Отклонение рабочего значения от номинального значения является естественным для многорежимных энергетических установок и предусматривается инструкциями по эксплуатации. Однако в процессе использования технических средств анализируемые отклонения происходят в том числе и по причине старения и износа, из-за изменения внешних условий, от перегрузок оборудования, вызванных боевой обстановкой и другими причинами. Старение и износ механизмов и аппаратов оказывает влияние не только на изменение конструктивных размеров отдельных узлов. Их влияние распространяется и на выходные характеристики элементов энергетической установки. В качестве примера на рис. 4.4 показаны зависимости температуры перегретого пара в паровом котле от нагрузки по топливу в первом эксплуатационном рейсе, через три года и через шесть лет эксплуатации. Из приведенных данных следует, что с увеличением срока службы котла температура пара имеет явную тенденцию к уменьшению.

В нормальных условиях эксплуатации отклонение параметра зависит от скорости старения и износа  $\gamma$ , которая за время  $\Delta T$  приведет к изменению значений параметра на величину  $\Delta x = \gamma \cdot \Delta T$ . Кроме того, процесс накопления износа и старения обладает большим рассеянием ввиду многих плохо поддающихся учету случайных факторов и зависит от очень многих обстоятельств. Поэтому величину износа следует отнести к разряду случайных величин, которые имеют среднеквадратическое отклонение  $\sigma_\gamma$ .



Из анализа следует, что в процессе эксплуатации рабочее значение параметра подвержено изменениям, которые имеют существенную стохастическую составляющую. Чем ближе рабочее значение параметра к предельному значению, тем опаснее его эксплуатация, тем выше вероятность возникновения предельного состояния.

Среднеквадратическое отклонение параметра  $\sigma$  характеризует разброс значений параметра вокруг среднего значения. На его величину оказывают влияние все те факторы, которые придают технологическому процессу стохастический характер. Составляющими общего с.к.о. являются с.к.о. скорости старения и износа. Поэтому с течением времени рассеивание значений параметров увеличивается и, следовательно, растет и общее среднеквадратическое отклонение, увеличивая вероятность перехода оборудования в предельное состояние. На рис. 4.5 показана зависимость среднеквадратического отклонения износа шлицев от наработки механизмов. Значения  $\sigma$ , приведены в процентах от максимальной величины износа. За 7000 часов рассеивание значений износа увеличивается в 2,5 раза и достигает 20%.

Снижения с.к.о. можно добиться тщательной настройкой регуляторов в системах автоматического управления и использованием приборов более высокого класса точности.

Значение вероятности нахождения параметра в области работоспособности оказывает решающее влияние на оценку

допустимого значения. Рост требований к вероятности  $P(x < x_{np})$  при неизменности остальных исходных данных ( $x_{np}$ ,  $x_{np}$ ,  $\sigma_y$ ) приводит к сужению рабочей области параметра. Степень влияния зависит от вида закона распределения. Расчеты показывают, что наиболее сильное влияние вероятности на допустимое значение происходит при нормальном законе распределения результатов измерений, если значение вероятности больше 0,962.

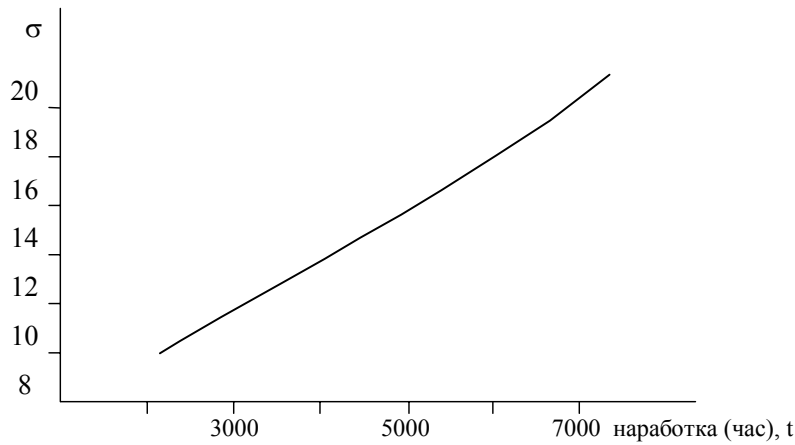


Рис. 4.5. Изменение среднеквадратического отклонения износа в зависимости от наработки

Численное значение вероятности определяется исходя из требований к надежности того оборудования, техническое состояние которого характеризует анализируемый параметр. Если вероятность безотказной работы изделия допускается не меньше  $P_{\partial}$ , его техническое состояние характеризуется  $k$  параметрами и отказ происходит при превышении предельного значения хотя бы одним параметром, то искомая вероятность равна

$$P(x < x_{np}) = \sqrt[k]{P_{\partial}} \quad (4.6)$$

Для корабельного оборудования вероятность безотказной работы лежит в пределах от 0,9 до 0,98. Следовательно, вероятность нахождения значений параметра в области работоспособности, должна иметь большие значения. Например, для изделия, состояние которого характеризуется двумя параметрами, она будет равна  $0,95 \div 0,99$ .

Таким образом, анализ факторов, влияющих на назначение допускового значения параметра, показывает, что для обеспечения заданной надежности функционирования технических средств допусковое значение может иметь различные значения в период его использования. В процессе эксплуатации на принятие решения о назначении допускового значения могут оказывать следующие причины перехода в опасное состояние:

- наработка оборудования,
- режим использования энергетической установки,
- условия плавания корабля.

По мере увеличения наработки, перемены режимов функционирования и изменения условий использования установки предельное значение отдельных параметров может изменяться. Для обеспечения заданной вероятности безотказной работы оборудования допусковое значение также должно меняться. Другими словами речь идет о гибком контроле функционирования оборудования. При постоянном допусковом значении обслуживающий персонал для подачи сигнала тревоги имеет дело с “жесткой” уставкой на приборе, измеряющем анализируемый параметр. Гибкий контроль означает, что допусковое значение параметра может изменяться в процессе эксплуатации. Изменение должно быть обосновано для каждого конкретного случая: для определенного режима работы, при заданной выработке ресурса или при каких-либо других причинах, способствующих возникновению предельного состояния.

Использование гибкого контроля позволяет повысить эффективность использования технических средств за счет расширения рабочей области изменения параметров в определенных условиях и при этом обеспечить надежность их эксплуатации. Повышение эффективности оборудования достига-



ется путем поддержания текущего значения параметра как можно ближе к допусчному значению, а обеспечение надежности достигается назначением допусковых значений, обеспечивающих заданную вероятность безотказной работы.

Опыт использования энергетического оборудования показывает, что в ряде случаев назначают несколько допусковых значений параметра в зависимости от причины, которая является условием возникновения опасного состояния. Это и есть гибкий контроль. Например, для газотурбинных установок при выработке ресурса назначают ограничения на максимальную мощность двигателей, для ядерных энергетических установок температуру теплоносителя ограничивают в зависимости от давления в первом контуре, для паротурбинных установок ограничивается мощность главного двигателя при плавании корабля в тропических условиях и т.д.

*Пример. В пароперегревателе осуществляется нагрев пара до температуры выше температуры насыщения. Чем выше температура, тем эффективнее функционирует энергетическая установка. Ограничением для повышения температуры является изменение свойств металла трубок пароперегревателя при перегреве. При критической температуре начинается образование окалины на внешней поверхности трубок, т.е. возникает предельное состояние для пароперегревателя. Предельное значение температуры перегретого пара рассчитывается с учетом теплопередачи через стенки трубок пароперегревателя. В таблице 4.2 приведены результаты расчета предельного и допускового значений температуры пара на различных нагрузках работы парового котла. Принято, что заданная вероятность нахождения параметра в области работоспособности равна 0,96, а среднеквадратическое отклонение получено в процессе испытаний котла и равно 14,5°С.*

*Анализ результатов показывает, что обеспечения надежной работы пароперегревателя область работоспособности необходимо изменять: чем больше нагрузка парового котла, тем меньше должны быть предельная и допустимая температура пара, величина запаса должна составлять от 28°С до 21°С. Для обеспечения надежной работы парового котла*

целесообразно предусмотреть так называемый гибкий контроль, при котором допуск назначается в зависимости от нагрузки оборудования.

Таблица 4.2.

Нагрузка Парового котла	%	40	60	80	100
Предельное значение	°C	563	555	545	536
Допускное значение	°C	535	529	526	515

#### 4.5. Влияние старения и износа на выбор допусковых значений параметров.

Старение и износ механизмов и аппаратов оказывают влияние на ухудшение рабочих характеристик элементов энергетической установки, на изменение конструктивных размеров отдельных узлов, которое влияет на предельное значение параметра, на увеличение рассеивания, как самих размеров деталей, так и скорости их увеличения. Характеристики износа и старения видоизменяют модель формирования постепенного отказа.

Для определенности будем считать, что при износе изменяется рабочее значение параметра, а при старении изменяется предельное значение параметра. В результате этих процессов могут изменяться следующие величины:

- средняя величина износа детали (математическое ожидание,  $M_x$ ), влияющая на рабочее значение параметра,  $\delta_p$  ;
- изменение предельного значения параметра из-за старения,  $\delta_{np}$  ;
- скорость изнашивания  $\gamma_u$  или старения,  $\gamma_c$  ;
- среднеквадратическое отклонение скорости изнашивания или старения,  $\sigma_\gamma$  ;
- среднеквадратическое отклонение износа или старения,  $\sigma_\delta = \sigma_\gamma \cdot T$ .

Перечисленные величины сужают область работоспособности параметра и оказывают существенное влияние на выбор допускового значения параметра. Факторы, изменяющие эти величины, могут действовать как по отдельности, так и в совокупности. Для анализа механизма влияния износа на изменение области работоспособности рассмотрим следующие случаи, когда количество анализируемых факторов постепенно увеличивается, а скорость изнашивания  $\gamma$  и начальное рассеивание параметров  $\sigma$  во всех случаях остаются без изменения.

1. Изменяется только величина износа детали, влияющая на рабочее значение параметра

$$\delta_p = \gamma_u \cdot T, \quad \sigma_\delta = \sigma, \quad = \text{const}, \\ \delta_{np} = \text{const}, \quad \sigma_\gamma = 0.$$

2. Изменяется величина износа и его среднеквадратическое отклонение

$$\delta_p = \gamma_u \cdot T, \quad \sigma_\delta = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_\gamma^2 \cdot T^2}, \\ \delta_{np} = \text{const}, \quad \sigma_\gamma = 0.$$

3. Изменяется величина износа, старения и среднеквадратическое отклонение износа

$$\delta_p = \gamma_u \cdot T, \quad \sigma_\delta = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_\gamma^2 \cdot T^2}, \\ \delta_{np} = \gamma_c \cdot T, \quad \sigma_\gamma = 0.$$

4. Изменяются все рассматриваемые величины кроме скорости старения и износа

$$\delta_p = \gamma_u \cdot T, \quad \sigma_\delta = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_\gamma^2 \cdot T^2}, \\ \delta_{np} = \gamma_c \cdot T, \quad \sigma_c = \sigma_\gamma \cdot T$$

Рассмотрим последовательно все четыре условия и выведем соответствующие формулы для определения вероятности нахождения параметра в области работоспособности, предполагая, что плотность распределения вероятностей подчиняется нормальному закону.

1. При изменении текущего значения параметра в результате износа отказ наступает в том случае, когда параметр достигает своего предельного значения через время  $T_p$ . Но из-за некоторого разброса значений параметров отказ может про-

изойти раньше. На рис. 4.6 показаны три основных этапа износа: начальный, промежуточный и конечный этапы.

В начальный момент в среднем поддерживается номинальное значение параметра. На рассеивание значений параметра относительно номинального значения не оказывают влияния процессы старения и износа. Даже наиболее удаленные от номинала значения параметра, появляющиеся в результате рассеивания, не превосходят предельного значения и вероятность нахождения значений параметра в области работоспособности равна единице.

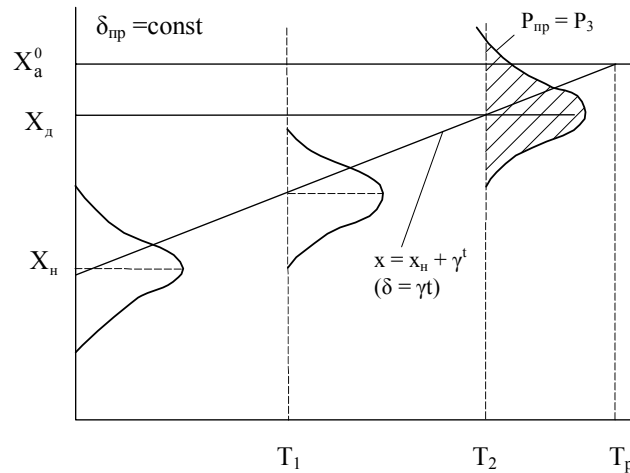


Рис. 4.6 Модель формирования постепенного отказа для первого условия

На втором этапе среднее текущее значение параметра начинает отклоняться от номинального значения в результате износа. При скорости износа равной  $\gamma$  через промежуток времени  $T_1$  среднее текущее значение станет равным

$$M_x = x_n + \gamma \cdot T_1 \quad (4.7)$$

Разброс значений параметра будет определяться только рассеиванием начальных показателей и останется таким же, как и на первом этапе. Наиболее удаленные от номинала зна-

чения параметра все еще не превосходят предельного значения, и вероятность остается прежней.

На третьем этапе про наработку равной  $T_2$  среднее текущее значение параметра отклоняется на величину

$$M_x = x_n + \gamma \cdot T_2 \quad (4.8)$$

При том же самом среднеквадратическом отклонении часть значений параметров превысит предельное значение, и вероятность нахождения параметра в допустимой области станет меньше единицы. Значение вероятности по аналогии с (4.2) будет равно

$$P(X < X_{np}) = 1 - \Phi\left(\frac{X_{np} - X_n - \gamma \cdot T}{\sigma}\right) \quad (4.9)$$

Вероятность отказа соответствует площади, заштрихованной на рис. 4.6. За допускное значение параметра следует принимать то среднее текущее значение, при котором вероятность нахождения значений параметра в области работоспособности равна заданному значению. Из рисунка видно, что ресурс изделия по исследуемому параметру определяется не временем  $T_p$ , когда значение параметра станет равным  $X_{np}$ , а временем  $T_2$ , когда выполняется условие

$$P(x < x_{np}) < P_s$$

2. Для второго случая условные этапы формирования отказа приведены на рис. 4.7.

Первоначально значения параметра распределяются около своего номинального значения, так же как и в предыдущем случае. На втором этапе имеет место некоторое отличие, которое вызвано тем, что через промежуток времени  $T_1$  изменится не только текущее значение параметра, но и увеличится разброс значений параметра вокруг среднего значения. Для среднего значения остается справедливым выражение (4.7). Среднеквадратическое отклонение состоит из двух слагаемых. Первое равно первоначальному его значению, а второе определяется с учетом разброса скорости изнашивания. Через промежуток времени  $T_1$  оно станет равным

$$\sigma_\delta = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_\gamma^2 \cdot T_1^2}$$

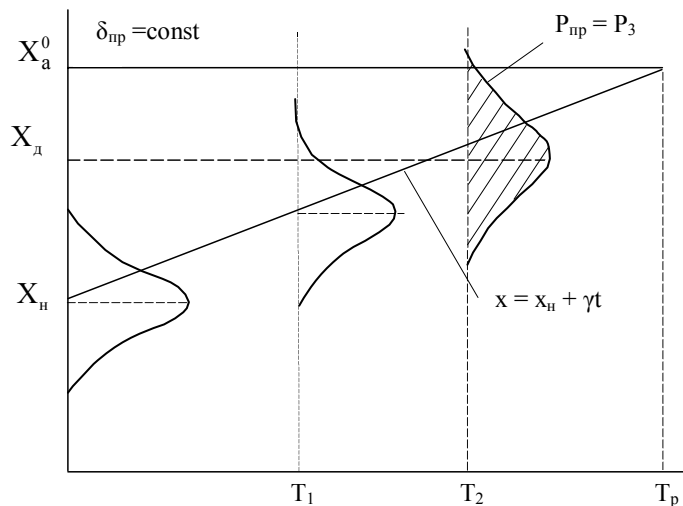


Рис. 4.7. Модель формирования постепенного отказа для второго условия.

На третьем этапе при наработке, равной  $T_2$ , величины  $x_{cp}$  и  $\sigma_\delta$  увеличиваются еще более так, что часть значений параметров превысит предельное значение и вероятность нахождения параметра в области работоспособности станет меньше единицы и будет равна

$$P(x < x_{np}) = 1 - \Phi \left( \frac{X_{np} - X_n - \gamma \cdot T}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_\gamma^2 \cdot T^2}} \right) \quad (4.10)$$

С учетом стохастичности скорости износа вероятность превышения параметром предельного значения наступает быстрее, чем в рассмотренном выше случае, и для обеспечения заданной вероятности  $P_{зад}$  необходимо выбирать допускное значение параметра ближе к номинальному значению.

3. Для третьего случая этапы формирования постепенного отказа показаны на рис 4.8.

Изменение среднего текущего значения и его средне-квадратического отклонения происходит также как в преды-

дущем случае. Кроме этого старение приводит к изменению предельного значения параметра. Для определенности примем, что скорость износа и старения равна постоянной величине и процесс идет в сторону уменьшения предельного значения от его начального значения  $x_{np}^0$ .

$$x_{np} = x_{np}^0 - \gamma \cdot T$$

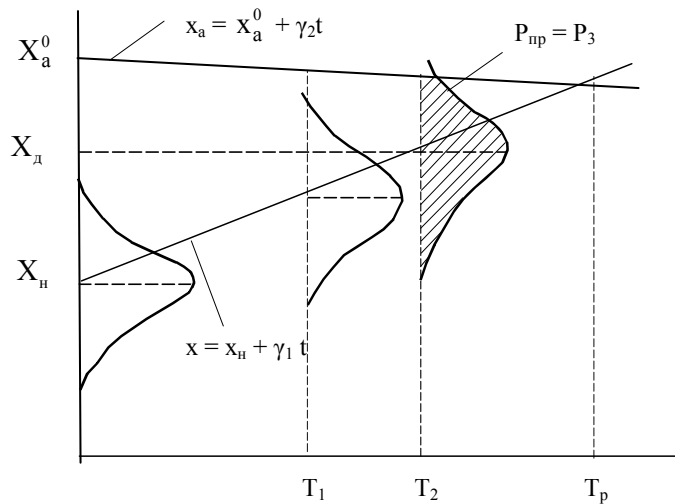


Рис. 4.8. Модель формирования постепенного отказа для третьего условия.

Изменение предельного значения приведет к тому, что к моменту времени  $T_2$  предельное значение уменьшится и, следовательно, вероятность нахождения параметра в области работоспособности станет меньше, чем во втором случае. Выражение для вероятности примет вид

$$P(x < x_{np}) = 1 - \Phi \left( \frac{x_{np}^0 - x_n - 2\gamma \cdot T}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_\gamma^2 \cdot T^2}} \right) \quad (4.11)$$

Соответственно для обеспечения заданной вероятности нахождения параметра в области работоспособности необхо-

димо допускное значение параметра выбирать еще ближе к номинальному значению, чем во втором случае.

4. Для последнего из рассматриваемых случаев этапы формирования постепенного отказа показаны на рис. 4.9.

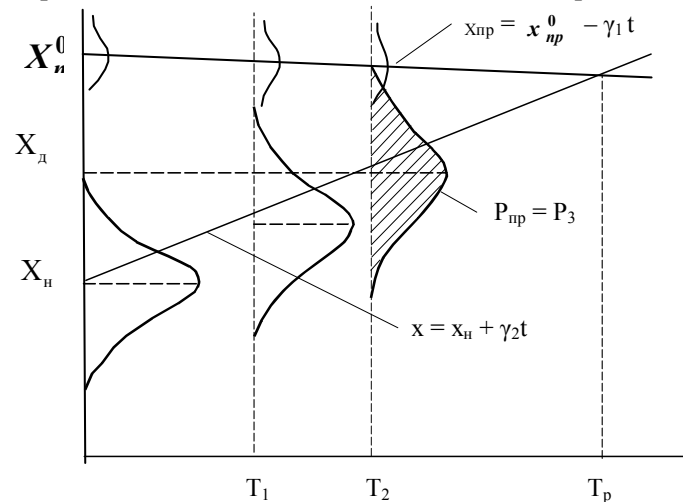


Рис. 4.9. Модель формирования постепенного отказа для четвертого условия.

В отличие от предыдущего случая здесь учитываются случайный характер старения, в результате которого предельное значение не только изменяется, но и имеет случайный характер. Рассеивание предельного значения из-за различий условий эксплуатации приведет к некоторому разбросу возможных его значений, и это обстоятельство также необходимо учитывать. Выражение для расчета вероятности нахождения параметра в области работоспособности примет вид

$$P(x < x_{np}) = 1 - \Phi \left( \frac{X_{np}^0 - X_n - 2\gamma \cdot T}{\sqrt{\sigma^2 + 2\sigma_\gamma^2 \cdot T^2}} \right) \quad (4.12)$$

Таким образом, получена расширенная модель формирования постепенного отказа. Из ее анализа следует, что долговечность узлов и деталей, вероятность безотказной работы и



допустимые значения параметров являются взаимосвязанными величинами. Износ и старение элементов энергетической установки приводит к уменьшению вероятности нахождения параметров в области работоспособности, а для удержания ее в заданных пределах необходимо изменять допускное значение.

Если для повышения эффективности использования энергетического оборудования необходимо поддерживать параметр как можно ближе к предельному значению, то процессы старения и износа могут существенно ограничить рабочий диапазон изменения параметра, т.к. допускное значение необходимо назначать с учетом долговечности оборудования. Очевидно, что для повышения эффективности энергетической установки на ранних этапах ее эксплуатации необходимо применять гибкие уставки, которые не только позволят повысить эффективность, но и обеспечат требуемую надежность эксплуатации.

*Пример. Определить предельное и допускное значение температуры воды после экономайзера в зависимости от времени его эксплуатации. Со временем в процессе эксплуатации характеристики аппарата ухудшаются, в том числе за счет глушения трубок в экономайзере. Этот процесс отражается коэффициентом неравномерности тепловосприятия. Для полностью исправного котла он равен 1,0, а при частично заглушенных трубках экономайзера с течением времени неравномерность тепловосприятия повышается, и коэффициент растет.*

*В таблице 4.3 приведены результаты расчета предельного и допустимого значений при различных значениях коэффициента неравномерности тепловосприятия. Принято, что  $P(x < x_{np}) = 0,96$  и  $\sigma = 11^\circ\text{C}$ .*

*Из таблицы следует, что допускное значение должно быть меньше предельного значения приблизительно на  $20^\circ\text{C}$ . Предельное состояние, т.е. вскипание воды, при неравномерном тепловосприятии наступает при значительно меньшей температуре, чем при равномерном тепловосприятии. Выполнение указанных требований обеспечивает вероятность нахождения параметра в допустимой области 0,96.*

В инструкции по эксплуатации не указываются предельные и допустимые значения, а приведена рекомендация по поддержанию температуры, равной 214°С, на максимальном режиме. Эта рекомендация вытекает из теплового расчета котла и удовлетворяет требованиям надежности исправного парового котла. Но с течением времени при глушении трубок экономайзера и высоких коэффициентах неравномерности температура воды будет выше допустимого ее значения. В этом случае надежность работы парового котла будет снижена. Очевидно, что использование гибкого контроля, предусматривающего уменьшение допускового значения с увеличением неравномерности тепловосприятия, направлено на обеспечение заданной надежности котла. Практически это означает, что по мере глушения трубок в экономайзере парового котла допусковое значение температуры воды после экономайзера должно уменьшаться.

Таблица 4.3

Коэффициент неравномерности тепловосприятия	1,0	1,1	1,2	1,3
Предельное значение	250	236	225	215
Допусковое значение	231	216	206	195
Запас	19	20	19	20
Требования инструкции по эксплуатации	214	214	214	214

В таблице 4.4 приведены результаты расчета предельного и допускового значений температуры пара после пароперегревателя в зависимости от нагрузки котла по топливу при разных значениях коэффициента неравномерности тепловосприятия. Физический смысл коэффициента неравномерности такой же, как и в предыдущем примере. Принято, что вероятность  $P(x < z_{np}) = 0,96$  и  $\sigma = 14,5^\circ\text{C}$ .

Сравнение допусковых значений температуры с требованиями инструкций показывает, что для полностью исправного парового котла нет никакой тревоги по поводу попадания пароперегревателя в предельное состояние. Но если частично трубки пароперегревателя заглушены так, что коэффициент неравномерности становится равным 1,3, появляется опас-

ность превышения параметром допускового значения на максимальной нагрузке. Следовательно, не будет обеспечена надежность парового котла. Подобной опасности можно избежать, если использовать принципы гибкого контроля.

Таблица 4.4

Нагрузка парового котла	Коэффициент неравномерности	40%	60%	80%	100%
Предельное значение	1,0	563	555	545	536
Допусковое значение		535	529	526	515
Предельное значение	1,3	535	520	493	476
Допусковое значение		517	482	467	444
Требование инструкции по эксплуатации	–	419	440	463	470

## **5. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ.**

При создании информационно-измерительных систем необходимо обеспечить сбор информации о значениях множества параметров, характеризующих объект измерения. Выбор наиболее существенных контролируемых параметров, необходимых для управления или для оценки технического состояния является центральной задачей метрологического обеспечения корабельных энергетических установок.

### **5.1. Краткий обзор методов выбора параметров.**

В большинстве случаев на практике выбор параметров обычно осуществляется по прототипу или на основании испытаний нового энергетического оборудования на экспериментальных стендах. Для сложного технического объекта можно выбрать большое число контролируемых параметров, но это потребует дорогой и сложной информационно-измерительной системы, увеличения времени контроля и не гарантирует, что вся измерительная информация будет полезной. Поэтому вопрос о выборе оптимального варианта состава контролируемых параметров необходимо связывать не только с определением их минимального числа, но и с видом параметров.

К настоящему времени оформились различные подходы к выбору параметров в зависимости от области их применения. По используемому математическому аппарату все подходы можно классифицировать как эвристические, статистические и аналитические.

Название эвристические в определенной степени условно и связано с тем, что способы предложены и апробированы, но не исследованы с точки зрения определенных критериев оптимальности. Они строятся на основе наблюдений за тем, как операторы воспринимают, перерабатывают и анализируют информацию о состоянии энергооборудования. При выявлении общих закономерностей формируются критерии информативности, позволяющие уменьшить число измеряемых физических величин. Путем ранжирования по степени уменьшения критерия в сферу контроля включаются те величины, которые наиболее тесно связаны с наблюдаемым явлением. Количество контролируемых величин устанавливается так, чтобы удовлетворить требованиям по точности и стоимости информационно-измерительной системы [3, 7, 23, 24].

Несмотря на успешное использование критериев информативности для определения состава контролируемых параметров область их применения ограничена конкретным объектом контроля. Они отражают субъективную точку зрения исследователя. Кроме того, критерии информативности, как правило, не связывают с необходимой точностью измерения.

Статистические методы получили развитие при выборе наиболее существенных признаков в теории распознавания образов [5, 25, 26,] и диагностических параметров в системах технической диагностики [5, 6], при разработке информационно-измерительных систем для судовых энергетических установок [27] и для радиоэлектронного оборудования [28]. В этом направлении можно выделить методы факторного анализа, метрические и вероятностные.

Использование факторного анализа характерно при отсутствии каких-либо априорных сведений о наблюдаемом объекте. В этом случае на основе обработки статистических данных определяют главные компоненты, содержащие основную часть информации, необходимой для распознавания ситуации [26, 29]. К факторному анализу близко примыкает метод, основанный на разложении Карунена-Лоэва [26, 29]. Здесь производится преобразование корреляционной матрицы к диаго-

нальному виду, а по количеству весомых диагональных элементов определяют оптимальную систему координат.

При наличии априорной информации о распознаваемой ситуации, о предполагаемой неисправности или об объекте контроля используют вероятностные характеристики принадлежности контролируемого события к определенному заранее известному классу. В качестве характеристик применяются вероятность достижения цели [25, 30], условные вероятности ошибок первого и второго рода, т.е. вероятности ложного и необнаруженного отказов [25, 27, 28, 30], дисперсии и математические ожидания значений контролируемых параметров [5, 25,]. Наибольшее развитие получили методы, использующие вероятности ошибок 1-го и 2-го рода. Отмеченные вероятности используются для оценки меры достоверности информации, получаемой оператором. Расчет этих характеристик и сравнение их с допустимыми значениями дает возможность определить требуемую полноту контроля и точность измерений. Для обеспечения заданной достоверности или времени контроля при минимальном объеме или стоимости аппаратуры формулируется оптимизационная задача [25]. Для практической реализации разработаны номограммы [27], алгоритмы оптимизации, основанные на методе половинного разбиения и на методе ветвей и границ [28].

Во многих задачах распознавания делается естественное предположение, что изображения объектов одного класса более близки друг другу, чем изображения разных классов. Метрические методы основаны на количественной оценке этой близости. В качестве изображения объекта принимается точка в пространстве признаков, мерой близости считается расстояние между точками. Эта мера является удобной для многомерных объектов контроля, и нашла применение в задачах как распознавания образов [25], так и технической диагностики [5].

Применение статистических методов ограничено классом изделий, выпускающихся большими сериями, из-за необходимости привлечения большого статистического материала. Именно поэтому они получили свое развитие для контроля радиоэлектронной аппаратуры. Другим ограничением примени-

мости методов является их направленность на оценку полноты контроля и точности аппаратуры без учета вида отдельных контролируемых физических величин.

В группу аналитических объединены направления, основанные на методе координат и на анализе структуры и взаимосвязей объекта контроля. Если в большинстве рассматриваемых ранее методов считалось, что контролируемые параметры являются независимыми величинами, то здесь зависимость между ними ставится во главу угла.

В аналитических методах выделяются базисные координаты из некоторого множества взаимосвязанных параметров, характеризующих объект контроля [31,32], и через них находят все остальные. Выбор оптимального набора параметров осуществляется с помощью логического, графоаналитического или алгебраического математического аппарата.

На использовании логических операций построен табличный метод. Выбор базисных координат производится путем исключения всех избыточных параметров, являющихся эквивалентными какому-либо существенному основному параметру и таким образом находятся все возможные варианты наборов параметров [33]. Окончательный вариант основных параметров выбирается с учетом затрат на организацию контроля.

В работе [34] осуществляется преобразование диагностической таблицы, которая считается заданной в качестве исходной информации и учитывает структуру и взаимосвязи объекта контроля. В диагностической таблице столбцы соответствуют всем возможным дефектным состояниям, а строки – диагностическим параметрам. Оптимальным является такой набор параметров, при котором отсутствуют одинаковые строки в диагностической таблице. Для целей минимизации числа точек контроля сложные объекты предлагается представлять граф-моделями, которые помогают проводить исследования логико-информационных процессов [35]. Алгоритм минимизации точек контроля сводится к вычеркиванию вершин графа, взаимосвязанных с другими тупиковыми вершинами, в которые стекается вся информация.

Формализация данного метода позволила разработать алгоритмы для решения задач на ЭВМ. Однако при большом числе вершин получается значительный объем логических операций. Кроме того, в основу метода положено решение логико-информационных задач, не требующих знания количественных зависимостей между параметрами, и тем самым теряется часть полезной информации. В частности, не оценивается значимость параметров и необходимая точность контроля.

Благодаря глубокоразвитому математическому аппарату алгебраические методы выбора контролируемых параметров нашли применение для сложных динамических объектов контроля [36]. Большую известность в теории оптимального управления сложными динамическими системами получила задача о наблюдаемости, сформулированная Р. Калманом [37]. В ней рассматриваются случаи, когда с удовлетворительной точностью доступны измерению лишь некоторые из координат, характеризующих динамику системы. В том случае, если по этим измерениям можно вычислить все остальные фазовые координаты, система является наблюдаемой, а измеренных координат достаточно для оценки состояния системы управления в целом. Действительно ли необходимы все измеренные координаты для оценки состояния системы? Этот вопрос не решается в задаче о наблюдаемости. Но условия, позволяющие определить минимальное число координат, достаточное для измерения, найдены в работе [38].

Таким образом, в настоящее время разработано большое количество методов выбора контролируемых параметров. Многие из них применимы только для конкретных объектов измерения. Наибольшей общностью обладают аналитические методы, основанные на анализе математических моделей объектов измерения.

Несмотря на большое количество методов научно-обоснованного выбора контролируемых параметров все они обладают определенной общностью – на предварительном этапе необходимо произвести глубокий метрологический анализ объекта измерения, а затем на окончательном этапе использо-



вать конкретный метод для обоснования состава контролируемых параметров.

## **5.2. Предварительный анализ объекта измерения для выбора параметров.**

При выборе контролируемых параметров необходимо учитывать следующие факторы:

- цели измерения параметров;
- оцениваемые показатели полезного эффекта и их допустимые значения;
- требуемая глубина контроля;
- степень влияния параметра на оцениваемый показатель;
- взаимозависимость параметров;
- возможность отклонения параметра от номинального значения;
- располагаемые ресурсы: стоимость, массо-габариты, надежность средств измерения.

Из приведенного перечня видно, что основным фактором, влияющим на выбор параметров, является цель измерения. Она определяет задачи, для решения которых производятся измерения. Основными задачами информационно-измерительных систем корабельных энергетических установок являются:

- контроль функционирования объекта измерения;
- измерение значения параметра, необходимого для принятия решения;
- диагностирование технических средств;

Каждая из этих задач требует для своего решения определенного множества параметров, которые могут пересекаться между собой.

Контроль функционирования является традиционной задачей систем управления. Он необходим в процессе использования по назначению КЭУ в целом или отдельных ее элементов и предусматривает измерение значения параметра и срав-

нение его с регламентируемым значением. При контроле в соответствии с вышеприведенной классификацией параметров (см. п. 2.1) следует различать две группы параметров:

- параметры, предназначенные для регулирования технологических процессов;
- параметры, предназначенные для обеспечения защиты объекта, предотвращающей возникновение опасных ситуаций.

При предварительном анализе состав первой группы параметров выбирается на основе опыта эксплуатации прототипа, произведенных расчетов оборудования и принятых принципов регулирования технологических процессов. Критерием отбора параметров первой группы является полнота контроля. Во вторую группу отбираются те параметры, отклонение которых от номинальных значений вызывает угрозу обслуживающему персоналу или способствует созданию аварийной ситуации. Критерием для отбора параметров второй группы является надежность оборудования и безопасность эксплуатации. Основанием для предварительного отбора параметров является также опыт эксплуатации или испытание оборудования на стенде. Изложенные принципы позволяют предварительно сформировать множество контролируемых параметров.

По результатам предварительного анализа составляется таблица, в которой указывается тип оборудования, название параметра и причина, по которой обосновывается включение параметра в состав первой или второй группы. Для примера в таблице 5.1 приведена форма сбора информации по предварительному отбору параметров.

Таблица 5.1

Тип оборудования	Группа параметров	Наименование параметра	Причина включения
Главный двигатель	Оперативный контроль	Частота вращения	Регулирование
	Аварийный Контроль	Температура подшипников	Перегрев и подплавление

Определение численного значения параметра путем его измерения прямым или косвенным способом производится не очень часто благодаря комплексной автоматизации технологи-

ческих процессов. Измеренные значения необходимы для принятия решения в той или иной ситуации. Как правило, они нужны при изменении режима работы установки или при необходимости изменения ее структуры, т.е. при включении или выключении механизмов и аппаратов. Отсюда следует, что параметрами, значения которых необходимо измерить в процессе функционирования, являются системными параметрами. Как правило, они являются составной частью множества контролируемых параметров.

В процессе диагностирования производится контроль технического состояния, поиск отказов и прогнозирование технического состояния. В соответствии с вышеприведенной классификацией параметров для диагностирования могут использоваться:

- внутренние структурные параметры;
- выходные диагностические параметры;
- сопутствующие параметры;
- тестовые параметры.

При выборе параметров для диагностирования необходимо учитывать специфические требования по однозначности, доступности и удобства измерения, информативности и технологичности. Влияние входных параметров, в частности внешней среды, при диагностировании должно быть исключительно посредством приведения измеряемых параметров к стандартным условиям.

На предварительном этапе выбор параметров для диагностирования осуществляется на основе анализа характерных и наиболее часто повторяющихся отказов оборудования в целом, его узлов и деталей. Критерием включения параметров в сферу контроля является наличие отказов в работе объекта по каждому их параметров. При анализе диагностируемого оборудования необходимо учитывать цель измерения. Контроль технического состояния позволяет оценить работоспособность средства, т.е. его способность выполнять заданные функции, сохраняя значение параметров в пределах, установленных нормативной документацией. При поиске отказов происходит процесс выявления того узла оборудования, отказ которого вы-

звал его неработоспособность. Очевидно, что здесь увеличивается глубина контроля и, следовательно, растет число измеряемых параметров или признаков отказа. При прогнозировании определяется техническое состояние на предстоящий интервал времени. Решение задачи прогнозирования требует выполнения высокоточных измерений и накопления результатов измерений. Поэтому при прогнозировании выбирают небольшое число контролируемых параметров, наиболее чувствительных к изменениям технического состояния.

По результатам предварительного анализа объекта диагностирования составляется таблица, в которой указывается тип оборудования, наименование узла или детали, признак неисправности, наименование структурного параметра, наименование диагностического параметра, предполагаемые метод и цель диагностирования.

В качестве примера в таблице 5.2 приведены результаты анализа проточной части турбины.

Предварительный выбор параметров объекта диагностирования в значительной степени определяется методом диагностирования, который можно использовать для оценки технического состояния или поиска неисправности. Дальнейший анализ должен быть направлен на определение сопутствующих параметров физических полей (например, частоты и уровня вибрации), выбор тестовых параметров в соответствии с методом диагностирования, выявление состава теплотехнических параметров и т.д. Он производится исходя из опыта эксплуатации и диагностирования оборудования, технических возможностей средств диагностирования, а также с использованием результатов диагностирования аналогичного оборудования.

Остальные факторы, оказывающие влияние на выбор параметров, при предварительном анализе объекта измерения не требуют детального рассмотрения. По ним требуется лишь собрать необходимые сведения, существо которых следует из названия факторов. Эти сведения будут использоваться при окончательном выборе параметров одним из рассмотренных ниже методов.

Таблица 5.2

№	Наименование неисправности	Структурный параметр	Признаки неисправности	Метод диагностирования	Диагностические параметры	Цель диагностирования
1	2	3	4	5	6	7
1.	Разрушение лопаток	Геометрические размеры, место расположения	Шум, вибрация	Виброакустический, параметрический	ВАХ, газодинамические параметры	Оценка тех. состояния
2.	Вытяжка лопаток	Зазор между лопаткой и корпусом Задиры на корпусе	Шум, вибрация, выбег ротора	Виброакустический, параметрический	ВАХ, время остановки двигателя	Оценка тех. состояния
3.	Обгорание лопаток	Геометрические размеры, место расположения	Присутствие частиц в газоходе	Тепловой, спектрометрический	Температурное поле, спектр	Оценка тех. состояния, поиск неисправности
4.	Нарушение структурной целостности	Размер трещин, местоположение	Шум, вибрация	Виброакустический, интроскопия эндоскопия	ВАХ, отклик на тест, изображение	Оценка тех. состояния, поиск неисправности, прогнозирование

1	2	3	4	5	6	7
5.	Эрозия лопаток	Наличие язвин	Шум, вибрация	Виброакустический, параметрический, эндо-скопия	ВАХ, газодинамические параметры, изображение	Оценка тех. состояния, поиск неисправности, прогнозирование

### 5.3. Формирование ограничений для выбора контролируемых параметров.

При выборе контролируемых параметров всегда существует много факторов, влияющих на его результат. Прежде всего, к ним относятся метрологические требования к проектируемому изделию, которые следует, безусловно, выполнять. Кроме того, разработка информационно-измерительной системы всегда происходит с учетом расходов определенных ресурсов. К ним относятся стоимостные затраты на создание приборов, масса и габариты изделия, надежность средств измерения, эффективность функционирования сложной системы и пр. Другими словами на выбор контролируемых параметров оказывают влияние ограничения, существенно сужающие возможности выбора.

Множество всех ограничений можно условно разделить на два вида. Ограничения одного вида вызываются максимально достижимым на современном этапе уровнем метрологического совершенства: приспособленностью объекта к методам и средствам измерения, точностью и достоверностью измерений, полнотой и периодичностью контроля и т.д. Ограничения другого вида должны отражать объективные условия эксплуатации объекта, требования заказчика, влияние метрологического обеспечения на эффективность эксплуатации объекта и т.п.

### 5.3.1. Влияние метрологических требований на выбор контролируемых параметров.

Из-за многогранности требований, предъявляемых к метрологическому обеспечению, ограничения могут задаваться в описательном виде с рекомендациями по применению той или иной аппаратуры и с перечислением условий эксплуатации объекта. Для обеспечения возможности сравнения метрологических характеристик требования следует формулировать в математической форме в виде конкретных значений показателей и характеристик аппаратуры.

Анализ корабельного оборудования показывает, что контроль его функционирования или оценка его технического состояния могут осуществляться несколькими способами. От выбора способа измерения зависят полнота  $K$  и достоверность  $D$  контроля, вероятность правильного обнаружения отказа  $P$ , глубина поиска отказавшего элемента  $Q$ , продолжительность  $t$ , периодичность  $T$  и стоимость  $C$  контроля, суммарная погрешность измерений каждого параметра  $\Delta_{\Sigma}$ .

Кроме того, набор метрологических показателей будет различным при решении каждой из задач контроля: контроль функционирования или диагностирование технических средств. Причем в процессе диагностирования может производиться оценка работоспособности, поиск причин возникновения отказов или прогнозирование остаточного ресурса и других характеристик оборудования. Примерный перечень показателей, которые следует учитывать при выборе контролируемых параметров энергетического оборудования для той или иной задачи, приведен в таблице 5.3.

При контроле функционирования важнейшими метрологическими показателями являются результирующая погрешность  $\Delta_{рез}$  или предел допустимой погрешности  $\Delta_{\Sigma}$ , полнота  $K$  и достоверность  $D$  контроля. Измерения должны проводиться с заданной периодичностью  $T$ , значение которой в значительной степени зависит от скорости изменения параметра.

Формулировка требований по этим показателям направлена на обеспечение обслуживающего персонала информацией, необходимой для выработки управляющих воздействий при оперативном контроле или воздействий защитного характера при аварийном контроле.

Таблица 5.3.

Задачи контроля	Критерии выбора контролируемых параметров							
	<i>K</i>	<i>D</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>t</i>	<i>T</i>	<i>C</i>	$\Delta\Sigma$
Контроль функционирования	+	+				+	+	+
Контроль работоспособности	+	+			+	+	+	
Поиск отказов			+	+			+	
Прогнозирование тех. состояния	+						+	+

При контроле работоспособности на первый план также выступают полнота *K* и достоверность *D* контроля. Требования по периодичности *T* измерений связаны с максимально-возможной скоростью изменения параметра. За время между замерами значения параметров не должны достигать предельных значений, при которых в объекте измерения произойдут необратимые изменения. Продолжительность измерений *t* и время обработки результатов зависит от типа изделия, вида технического обслуживания, и времени, затрачиваемого на него. Для механического оборудования продолжительность измерений не должна превышать 20% от времени, отводимого на техническое обслуживание.

При поиске отказов важными являются две метрологические характеристики: должна быть обеспечена вероятность правильного обнаружения отказа *P* и глубина поиска отказавшего элемента *Q*. Поиск отказа производится с заданной вероятностью *P<sub>зад</sub>* и до такой глубины, которая определяется заменой отказавшего элемента из ЗИПа.



Решение задачи прогнозирования требует высокоточных измерений определенной номенклатуры параметров. Поэтому для этой задачи важнейшими метрологическими показателями являются полнота контроля и суммарная погрешность измерений.

При решении любых задач контроля важным показателем метрологического обеспечения становится стоимость  $C$  системы контроля. Стоимостной показателем является общей мерой качества, учитывающей расходы на разработку, изготовление и эксплуатацию всей системы контроля, предназначенной для решения всех свойственных им задач.

Метрологические показатели, рассмотренные выше, должны быть нормированы и указаны в требованиях по метрологическому обеспечению технических средств. Часть из них может быть нормирована только в ходе проектирования, когда производятся предварительные расчеты данных, необходимых для нормирования показателей. Выбор контролируемых параметров и точности их измерения производится таким образом, чтобы выполнялась система неравенств в каждой из задач контроля:

- при контроле функционирования:

$$K < K_{зад}$$

$$D < D_{зад}$$

$$\Delta_{\Sigma} < \Delta_{\Sigma \text{ зад}}$$

$$C < C_{зад}$$

(5.1)

- при контроле работоспособности:

$$K < K_{зад}$$

$$D < D_{зад}$$

(5.2)

$$\Delta_{\Sigma} < \Delta_{\Sigma \text{ зад}}$$

$$T < T_{\text{зад}}$$

$$C < C_{\text{зад}}$$

- при поиске отказа:

$$P < P_{\text{зад}}$$

$$Q < Q_{\text{зад}} \quad (5.3)$$

$$C < C_{\text{зад}}$$

- при прогнозировании:

$$K < K_{\text{зад}}$$

$$\Delta_{\Sigma} < \Delta_{\Sigma \text{ зад}} \quad (5.4)$$

$$C < C_{\text{зад}}$$

При малом числе параметров, характеризующих объект измерения, выбор состава контролируемых параметров не вызывает затруднений, и его можно осуществить простым перебором. В сферу контроля должны войти те параметры, которые удовлетворяют приведенным ограничениям. Точность и периодичность измерения также должны не превосходить нормированных значений.

Для сложных объектов измерения соблюдение условий не превышения нормированных значений показателей не позволяет однозначно рекомендовать группу контролируемых параметров и точность их измерения, но дает возможность, по крайней мере, сократить число альтернативных вариантов.

### 5.3.2. Влияние погрешности измерения на метрологические показатели.

С повышением точности контрольно-измерительных приборов снижается их метрологическая надежность, растет масса и габариты приборов, увеличивается стоимость изготовления, растет потребление энергии, усложняется эксплуатация средств измерения, требуется более квалифицированный персонал и т.д.

Факторы, ограничивающие точность измерения физических величин, существенно сужают возможности применения различных вариантов контрольно-измерительных приборов на кораблях. Но они остаются все же достаточно широкими для использования средств измерения различного класса точности. Например, для таких физических величин как давление, температура, частота вращения имеются приборы, удовлетворяющие требования ВМФ, начиная с класса точности 1.0. Тем не менее, стремление повысить точность измерения параметров приводит к ухудшению других характеристик приборов, влияет на их стоимость.

Наличие погрешности измерения обычно связывают с сопутствующими ей потерями некоторого ресурса, которые рассматриваются как неотрицательная функция погрешности. Термин “потеря” здесь носит условный характер и под ним понимают дополнительные затраты, которые необходимо произвести на улучшение аппаратуры. Это затраты, необходимые для повышения точности измерения, благодаря которой увеличивается эффективность управления, или потери в массе, в габаритах, в энергопотреблении приборов, т.к. с повышением их точности эти показатели растут и т.д. [40, 41].

Выражения, отражающие степень участия переменных в увеличении потери ресурса, являются уравнениями связи между переменными. В данном случае переменными являются погрешности измерения контролируемых физических величин. Уравнения связи имеют вид:

$$\varphi(\delta_1, \dots, \delta_m) = R_r \quad r = 1, \dots, \rho \quad (5.5)$$

где  $R_r$  – значение ресурса  $r$ , ограничивающего повышение точности измерения,  $\delta_1, \dots, \delta_m$  – предел допустимой погрешности измерения, записанный в относительной форме (для упрощения записи индекс “ $\Sigma$ ” опущен). В общем случае число ресурсов равно  $\rho$ .

В большинстве случаев для совокупности измеряемых параметров однотипные потери могут складываться. Например, стоимость или масса информационно-измерительной системы может быть представлена как сумма соответствующих составляющих для отдельных приборов. В таких случаях функции (5.5) являются сепарабельными, и их можно записать как сумму  $m$  функций, каждая из которых является функцией только одной переменной и отражает влияние погрешности измерения параметра на изменение ресурса, т.е.

$$\varphi(\delta_1, \dots, \delta_m) = \varphi_{r1}(\delta) + \dots + \varphi_{ri}(\delta) + \dots + \varphi_{rm}(\delta) \quad (5.6)$$

Функцию, отражающую изменение характеристик средства измерения с увеличением предела допустимой погрешности, т.е. с повышением класса точности, называют функцией затрат. Она устанавливает связь между затрачиваемым ресурсом контрольно-измерительного прибора и его основной характеристикой – классом точности. Функция характеризует дополнительные затраты на улучшение аппаратуры, которые необходимо произвести для снижения ошибки измерения. Для ресурса любой природы функцию затрат на прибор  $R_n$  представляют в виде гиперболической функции от его погрешности [40, 41, 42].

$$\varphi(\delta) = R_n(\delta) = \frac{\beta}{\delta} \quad (5.7)$$

Считается, что для некоторых типов приборов, чаще всего электронных, скорость возрастания стоимости с повышением точности различна. Для учета этого фактора вводят коэф-

коэффициент  $\gamma$ , отражающий скорость возрастания стоимости прибора от погрешности. Поэтому иногда функцию затрат, отражающую стоимость, характеризуют выражением [39]

$$C_{\Pi} = \frac{\beta}{\delta^{\gamma}} \quad (5.8)$$

где  $C_{\Pi}$  - стоимость одного прибора.

При контроле энергетического оборудования с помощью  $m$  контрольно-измерительных приборов суммарная функция затрат может быть аппроксимирована в виде сепарабельной функции

$$R = \sum_{i=1}^m R_{\Pi i} \quad (5.9)$$

где  $R$  – значение характеристики информационно-измерительной системы, отражающей вид ограничивающего ресурса.

Из выражения (5.9) следует, что уравнение связи, отражающее затраты на повышение точности приборов, могут быть представлены выражением

$$\psi(\delta_1, \dots, \delta_m) = \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\delta_i} - R = 0 \quad (5.10)$$

Для составления уравнения связи, отражающего функцию затрат, необходимо найти коэффициенты  $\beta_i$  задаться, например, суммарной стоимостью информационно-измерительной системы  $S$ , которая в данном случае является ограничивающим ресурсом.

Среднее значение коэффициентов  $\beta_i$  можно найти известным в математической статистике методом наименьших квадратов [14]. Для этого прологарифмируем уравнение (5.10). (Для упрощения записи опустим индекс “ $i$ ”)

$$\log R = \log \beta - \log \delta \quad (5.11)$$

Найдем уравнение линейной регрессии для уравнения (5.11). Здесь  $(\log \delta)$  является аргументом,  $(\log R)$  - функцией, а  $(\log \beta)$  - свободным членом уравнения. Для линейного уравнения (5.11) свободный постоянный коэффициент находится по формуле

$$\log \beta = \frac{\sum_{k=1}^n \log R_k - \sum_{k=1}^n \log \delta_k}{n} \quad (5.12)$$

где  $R_k, \delta_k$  - характеристика и класс точности контрольно-измерительных приборов, по которым ведется осреднение ( $k=1, \dots, n$ ). Значения характеристик приборов различных классов точности можно найти в соответствующих Прейскурантах оптовых цен и формулярах на контрольно-измерительные приборы. После нахождения коэффициентов для каждого измеряемого параметра получим искомое уравнение связи.

Ориентировочные значения коэффициентов  $\beta$  и  $\gamma$  для теплотехнических и электротехнических приборов представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4.

Теплотехнические приборы			Электротехнические приборы		
Наименование приборов	$\beta$	$\gamma$	Наименование приборов	$\beta$	$\gamma$
Термометр	1,5 ÷ 4,5	1,0 ÷ 2,0	Амперметр постоянного тока	15,8	1,0
Манометр	10 ÷ 30	1,0 ÷ 0,3	Амперметр переменного тока	21	1,0
Вакуумметр	6 ÷ 18	1,0 ÷ 0,8	Вольтметр постоянного тока	20	1,0
Тахометр	45 ÷ 80	1,0	Вольтметр переменного тока	24	1,5
Нефтемер	75 ÷ 100	1,0	Вольтметр электронный	500	0,5
Расходомер	100 ÷ 1000	1,0			
Уровнемер	400 ÷ 1000	1,0			
Солемер	800 ÷ 1600	1,0			
Газоанализатор	1800 ÷ 3600	1,0			

Для перерасчета уравнений связи из-за изменения цен необходимо иметь в виду, что численно коэффициент  $\beta$  равен стоимости прибора, имеющего класс точности 1.0. Поэтому для ориентировочных расчетов можно использовать это значение.

### 5.3.3. Влияние погрешности измерения на эффективность контролируемого оборудования.

Влияние ошибки измерения параметров на показатель, характеризующий назначение объекта или конечную цель управления им, лежит в основе формирования требований к точности контроля [1, 43]. Для энергетической установки в целом обобщенными показателями, отражающими ее эффективность, являются мощность на гребном валу, частота вращения гребного вала, коэффициент полезного действия, расход топлива на милью и др. Первые два показателя оказывают непосредственное влияние на боевую эффективность корабля, третий и четвертый указывают на экономичность самой энергетической установки. Конечная цель управления техническими средствами отражается системными параметрами – показателями, характеризующими роль элемента в выполнении технической системой своей главной задачи.

В любом случае обобщенный показатель  $\Pi$  объекта контроля, характеризующий качество его функционирования, связан с непосредственно измеряемыми величинами  $X_1, \dots, X_m$ . Представим эту зависимость в общем виде

$$\Pi = \varphi(X_1, \dots, X_m) \quad (5.13)$$

Если значения параметров  $X_1, \dots, X_m$  в действительности отличаются от идеальных значений на малые величины  $\Delta X_1, \dots, \Delta X_m$ , то значение показателя  $\Pi$  также будут отличаться от идеального значения. Разлагая функцию (5.13) в ряд

Тейлора и ограничиваясь в виду относительной малости погрешностей членами первого порядка, получим

$$\Pi + \Delta\Pi = \Pi + \frac{\partial\varphi}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial\varphi}{\partial x_m} \Delta x_m \quad (5.14)$$

где коэффициенты при переменных являются частными производными функции (5.13) по соответствующим параметрам непосредственного измерения.

Из выражения (5.14) имеем

$$\Delta\Pi = \frac{\partial\varphi}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial\varphi}{\partial x_m} \Delta x_m \quad (5.15)$$

Выражение (5.15) с успехом применяется в приближенных вычислениях при оценке погрешностей [44]. Здесь погрешности  $\Delta x_1, \dots, \Delta x_m$  и коэффициенты при них могут быть как положительными, так и отрицательными. Заменяя те и другие абсолютными величинами, получим неравенство

$$\Delta\Pi \leq \left| \frac{\partial\varphi}{\partial x_1} \right| \cdot |\Delta x_1| + \dots + \left| \frac{\partial\varphi}{\partial x_m} \right| \cdot |\Delta x_m|$$

Если принять обозначения  $\Delta\Pi, \Delta_1, \dots, \Delta_m$  для максимальных абсолютных погрешностей, то получим выражение [45]

$$\Delta\Pi = k_1 \Delta_1 + \dots + k_m \Delta_m \quad (5.16)$$

где  $k_i = \left| \frac{\partial\varphi}{\partial x_i} \right|$  - коэффициенты влияния.



Коэффициенты влияния в выражении (5.16) характеризуют чувствительность искомого показателя к отклонению параметров.

При известном законе распределения погрешностей и при заданной доверительной вероятности максимальная погрешность прямо пропорциональна среднеквадратичному отклонению [46].

Выражение (5.16) является сепарабельной функцией максимального отклонения показателя от  $m$  переменных. Допуск на значения показателя устанавливается техническими условиями на проектирование. Примем его в качестве ресурса  $R$ . При заданном ресурсе выражение (5.16) характеризует взаимосвязь погрешностей измерения физических величин и может служить в качестве уравнения связи в оптимизационных задачах.

$$R = k_1\Delta_1 + \dots + k_m\Delta_m \quad (5.17)$$

Коэффициенты влияния характеризуют преимущество одного параметра перед другим при распределении ресурса. Чем больше коэффициент у параметра, тем больше изменяется обобщенный показатель при отклонении данного параметра. Если все параметры изменятся на одну и ту же величину, то наибольший вклад в изменение ресурса внесет тот параметр, у которого коэффициент влияния больше. Ранжирование параметров по мере увеличения коэффициента влияния позволяет наглядно убедиться в приоритете одного параметра перед другим.

#### **5.4. Методы обоснования выбора контролируемых параметров.**

Окончательный выбор контролируемых параметров производится из совокупности параметров, отобранных на предварительном этапе. Метод выбора параметров зависит от матема-

тической модели объекта измерения, которая представляет объект с точки зрения цели измерения и задач, стоящих перед системой контроля [2]. Модель может быть представлена различным способом: функцией качества, алгебраическим матричным уравнением, системой дифференциальных уравнений или передаточными функциями, а также в логических уравнениях или граф-моделями. Она должна отражать структуру изделия, взаимосвязи функциональных элементов, последовательность проходящих в нем физических процессов. Во всех случаях она связывает между собой измеряемые параметры и свойства или показатели качества объекта, которые необходимо обеспечить при функционировании.

Большое число научно-обоснованных методов выбора параметров вызывает некоторую неопределенность в их применении. Принципиальное различие методов выбора параметров заключается в обеспечении полноты контроля. Если необходимо обеспечить 100% полноту контроля, то следует использовать топологический или аналитический методы. Если полнота контроля не входит в состав обязательных для соблюдения метрологических показателей, то выбирают наиболее существенные с некоторой точки зрения параметры. В этом случае используют различные методы ранжирования, основанные на выборе параметров, имеющих наибольшие значения критериев, отражающих цель измерения или задачи системы контроля.

#### **5.4.1. Метод ранжирования параметров.**

В процессе ранжирования параметры, выделенные на предварительном этапе, располагают в порядке убывания их ценности для получения необходимой информации об объекте измерения. Это можно осуществить либо методом экспертных оценок, либо по некоторому показателю, характеризующему ценность параметров.

При использовании метода экспертных оценок группа экспертов располагает параметры в порядке убывания по рангам, соответствующим их ценности. В качестве экспертов используются специалисты, обладающие определенным уровнем знаний в области проектирования и эксплуатации объекта измерения. В результате экспертизы получают ранжированный ряд параметров и степень согласованности мнений экспертов, оцениваемой коэффициентом согласия [10, 11]. Можно повысить достоверность экспертизы, если учитывать степень компетентности экспертов [11]. Недостатком этого метода является некоторая субъективность мнений, снижающая качество отбора параметров.

Ранжирование по показателю лишено этого недостатка, но в существенной степени зависит от адекватности математической модели, отражающей связь выбранного показателя с контролируруемыми параметрами. В простейшем случае модель объекта измерения может быть представлена в виде функции качества

$$П = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.18)$$

После дифференцирования по каждому из параметров  $x_i$ , модули производных, характеризующих чувствительность показателя к параметрам, располагают в порядке их убывания и получают ранжированный ряд  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Этот метод можно использовать как при организации контроля функционирования, так и при контроле технического состояния. При необходимости прогнозирования технического состояния в качестве показателей можно использовать производные по времени для каждого из исследуемых параметров, выраженные в относительной форме. Для получения производных необходимо иметь математическую модель, отражающую изменение параметров во времени. Расположение производных в порядке убывания также позволяет получить ряд  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Ранжирование параметров удобно производить по критерию ценности информации, получаемой при измерении пара-

метров. Выбор критерия ценности информации производят в зависимости от целей контроля. В п. 2.2. приведены критерии важности параметров для оперативного и аварийного контроля.

Во всех случаях ранжирования  $n$  параметров, выделенных на этапе предварительного отбора, необходимо выбрать  $m$  параметров, удовлетворяющих требованиям по полноте  $Q$  и достоверности  $(\alpha, \beta)$  контроля, по стоимости  $C$  и надежности  $P$  средств измерения и др., т.е. должна выполняться система неравенств (5.1) – (5.4), например,

$$\begin{aligned} Q &\leq Q_{\text{доп}} \\ \alpha_i &\leq \alpha_{i_{\text{доп}}} \\ \beta_i &\leq \beta_{i_{\text{доп}}} \\ C &\leq C_{\text{доп}} \\ P &\geq P_{\text{доп}} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Для ранжирования параметров могут быть использованы и другие, так называемые, критерии информативности, которые разрабатываются применительно к конкретному объекту измерения и отражают цель измерения. Тем не менее, метод ранжирования нашел широкое распространение в практике проектирования систем контроля и технической диагностики.

*Пример. Определить приоритет параметров котлотурбинной установки по их чувствительности к ее мощности.*

*Путем вычислительного эксперимента с помощью математической модели необходимо найти частные производные обобщенного показателя по каждому из анализируемых параметров. Для этого следует поочередно изменить значения каждого параметра на 5%, поддерживая постоянными значения остальных параметров. Замеряя в каждом случае изменения обобщенного показателя, можно определить частные производные. Их значения зависят от режима работы установки. Затем производится ранжирование параметров по*

мере увеличения коэффициентов влияния на режиме полного хода. Результаты расчетов приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5.

Наименование параметра	Малый ход	Полный ход	Ранг
Перепад давления на пароперегревателе главного котла	0,41	0,47	1
Давление пара в коллекторе котла	0,33	0,37	2
Температура уходящих газов	0,11	0,29	3
Температура питательной воды	0,17	0,16	4
Температура воздуха	0,017	0,063	5
Давление перегретого пара	0,057	0,05	6
Температура перегретого пара	0,005	0,034	7
Температура топлива	0,009	0,0047	8
Угол поворота маховика нагрузки	0,031	0,0039	9
Давление топлива перед пультом	0,03	0,002	10

Из таблицы следует, что влияние последних четырех параметров на обобщенный показатель незначительное и зависит от режима работы установки.

#### 5.4.2. Ранжирование параметров по критерию запаса надежности.

Ухудшение технического состояния изделия проявляется в изменении структурных параметров. Они характеризуют геометрические размеры узлов и деталей изделия, зазоры кинематических пар, физические и химические свойства материала и т.п. От них зависит долговечность изделия. Превышение структурными параметрами своего предельного значения свидетельствует о выработке ресурса.

Как правило, структурные параметры не могут быть измерены непосредственно без разборки. Поэтому о значениях структурных параметров судят по значениям параметров, измеряемых непосредственно и функционально связанных с ними. Процедура диагностирования энергетического оборудования включает в себя следующие операции: выделение структурного параметра, являющегося причиной возникновения от-

каза, оценка его значения и сравнение с допуском. Если структурный параметр за весь период эксплуатации остается в допустимых пределах, то не имеет смысла его контролировать. Структурные параметры узлов и деталей, в наибольшей степени ограничивающие долговечность изделия правомерно называть критическими параметрами. Для их выявления можно использовать вероятностный подход, основанный на модели постепенного отказа (см. п. 4.3). Он позволяет учитывать не только скорость изнашивания деталей изделия, как это делается обычно, но и статистические характеристики изделия путем оценки коэффициента запаса надежности.

В последнее время в технической литературе для количественной оценки запаса надежности начали вводить специальные коэффициенты, отражающие величину запаса. Предложено [47] ввести коэффициент надежности как отношение предельного значения параметра к допустимому значению.

$$K_n = \frac{X_{пр}}{X_d} \quad (5.20)$$

где:  $x_{пр}$  – предельное значение параметра,  
 $x_d$  - допустимое значение параметра.

Коэффициент надежности всегда должен быть больше единицы и характеризует ширину опасной области (см. рис.2.3). Действительно, произведем замену числителя в формуле (5.20) с помощью выражения:

$$x_{пр} = x_d + \Delta_{он} ,$$

где  $\Delta_{он}$  - ширина опасной области.  
 После подстановки получим:

$$K_n = 1 + \frac{\Delta_{пр}}{X_d} \quad (5.21)$$

Формулы (5.20) и (5.21) характеризуют запас надежности до наступления отказа. В ряде случаев целесообразно рассмат-

ривать запас надежности до достижения оборудованием заданной вероятности безотказной работы. Учитывая, что заданная вероятность будет обеспечена при достижении параметром допустимого значения, представим коэффициент запаса как отношение допустимого значения к номинальному или текущему значению параметра.

$$K_3 = \frac{x_{\partial}}{x_n} \quad (5.22)$$

Коэффициент запаса (5.22) также всегда больше единицы и характеризует ширину рабочей области, т.к. допускное значение равно

$$x_{\partial} = x_n + \Delta_p$$

Функционирование оборудования должно допускаться лишь в том случае, если вероятность безотказной работы не меньше заданной. В противном случае необходимо предусматривать профилактический ремонт. Ввиду этого коэффициент запаса  $K_3$ , определяемый по формуле (5.22), является более практичным для использования. В процессе эксплуатации в результате воздействия внешних факторов, старения и износа оборудования текущее значение параметра приближается к допускному значению и даже может превзойти его. Отсюда следует, что коэффициент запаса во время эксплуатации уменьшается, т.е. он является убывающей от времени функцией. При заданном ресурсе оборудования слабым узлом является тот, для которого коэффициент запаса по критическому параметру меньше.

Для большинства контролируемых параметров используется постоянное допускное значение в течение всего периода эксплуатации, но тогда в начале использования оборудования оно должно приниматься с большим запасом надежности. По мере израсходования ресурса уменьшается значение коэффициента запаса для анализируемого параметра. Если в течение определенного промежутка значение коэффициента запаса не становится меньше единицы, то это означает, что в его

контроле в это время нет никакой необходимости.

На рис 5.1 в качестве примера показаны зависимости коэффициента запаса надежности по критическим параметрам двух узлов изделия. Для первого из них коэффициент запаса всегда больше 1 в течение всего периода его использования. Это означает, что текущее значение параметра никогда не достигнет допустимого значения. Для второго узла он становится меньше 1. Следовательно, для него необходим контроль критического параметра во время эксплуатации.

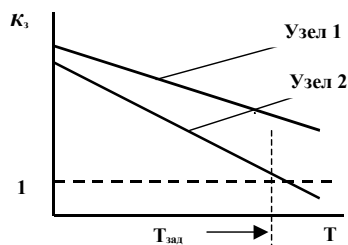


Рис. 5.1. Изменение коэффициента запаса надежности в процессе эксплуатации

Коэффициент запаса может быть использован в качестве критерия, обосновывающего включение анализируемого параметра в сферу контроля. Контроль параметра, характеризующего надежность оборудования, необходим только в том случае, когда значение коэффициента запаса по этому параметру станет меньше единицы до истечения заданного ресурса.

После выделения структурных параметров подбираются соответствующие диагностические параметры в зависимости от их физической природы, которые можно использовать для получения информации об изменениях структурных параметров. Это могут быть выходные или технологические параметры диагностируемого объекта, специальные тестовые параметры или параметры сопутствующих физических полей. Затем из номенклатуры средств технического диагностирования находят прибор, отвечающий требованиям точности, достоверности контроля, диапазона измерения, стоимости и др.



*Пример. Обоснование выбора структурных параметров, необходимых для диагностирования гидравлической части циркуляционного насоса (см. рис.5.2).*

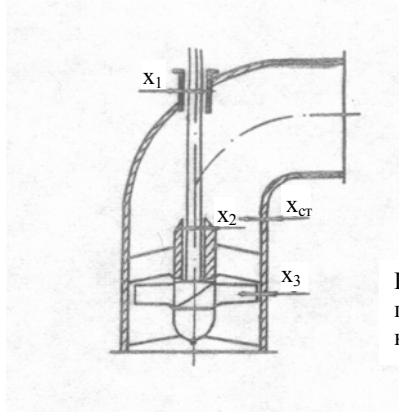


Рис 5.2. Выбор структурных параметров циркуляционного насоса.

*Из предварительного анализа насоса следует, что характерными для этого объекта структурными параметрами являются:*

- зазор в верхнем подшипнике вала рабочего колеса  $x_1$ ;*
- зазор в нижнем подшипнике вала рабочего колеса  $x_2$ ;*
- зазор между рабочим колесом и уплотнительным кольцом  $x_3$ ;*
- толщина стенки приемной части и крышки насоса  $x_4$ .*

*Указанные параметры характеризуют все основные узлы и детали, подверженные износу в процессе эксплуатации.*

*Обоснование необходимости контроля какого-либо из этих параметров в процессе эксплуатации предполагает выполнение следующих операций:*

- 1. Расчет предельных значений параметров.*
- 2. Расчет допускового значения параметров при заданной вероятности безотказной работы насоса.*
- 3. Оценка скорости изменения текущего значения структурных параметров в период до заводского ремонта.*
- 4. Оценка коэффициента запаса и выделение параметров, рекомендуемых для диагностирования.*

Рассмотрим каждую из этих операций.

### **1. Предельное значение структурных параметров.**

Предельные значения зазоров в подшипниках ( $x_1, x_2$ ) определяются из условия прочности креплений крышек подшипников под действием несбалансированной силы от смещения теоретической и фактической осей вращения рабочего колеса. Поломка шпилек означает переход насоса в предельное состояние. Расчет шпилек на прочность под действием переменной нагрузки показывает, что максимальное значение зазора, при котором еще не происходит их поломка, равно 1,82мм.

Предельное значение зазора ( $x_3$ ) между кромками рабочего колеса и уплотнительным кольцом находится из условия обеспечения подачи насоса, необходимой для охлаждения оборудования. Производительность является системным параметром насоса. Из расчетов следует, что она может быть уменьшена только на 8,7%, иначе из-за недостаточного охлаждения могут начаться необратимые процессы в других элементах установки. Экспериментальные исследования показывают, что такое уменьшение производительности насоса происходит при зазоре, равном 39,2мм.

Предельное значение толщины стенок ( $x_4$ ) приемной части и крышек насоса в результате их утонения определяется из расчета на прочность. Оно равно 1,65мм.

### **2. Расчет допускового значения структурных параметров.**

Расчет допускового значения произведем при следующих допущениях:

- закон распределения значений параметров – нормальный,
- вероятность нахождения параметров в допустимой области – 0,96,
- среднееквадратическое отклонение: -  $\sigma_{1,2} = 8\%$ ,  
-  $\sigma_3 = 2,3\%$ ,  
-  $\sigma_4 = 25,7\%$ .

### 3. Оценка скорости изменения текущего значения структурных параметров.

Износ узлов и деталей гидравлической части насоса происходит в результате коррозионных и эрозионных процессов, которые имеют линейный характер. Поэтому для оценки величины износа достаточно знать его скорость. Скорость износа для работающего насоса равна:  $\gamma_{1,2} = 10 \cdot 10^{-6}$  мм/ч

$$\gamma_3 = 64,5 \cdot 10^{-6} \text{ мм/ч}$$

$$\gamma_4 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ мм/ч}$$

Ресурс до заводского ремонта примем равным  $60 \cdot 10^3$  часов.

### 4. Оценка коэффициента запаса и выделение параметров, рекомендуемых для диагностирования.

Результаты расчета коэффициента запаса, а также предельного, допускового и текущего значений параметров в конце заданного срока эксплуатации перед заводским ремонтом приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6.

Наименование	Размерность	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Среднее значение параметра в начале эксплуатации.	мм	0,25	0,22	1,64	9,50
Величина износа за период эксплуатации.	мм	0,192	0,192	7,76	6,90
Среднее значение параметра перед ремонтом.	мм	0,452	0,412	9,40	6,90
Предельное значение параметра.	мм	1,82	1,82	39,2	1,65
Допусковое значение параметра.	мм	1,76	1,76	38,9	2,70
Коэффициент запаса	-	3,92	4,27	4,17	0,96

Анализ результатов расчета показывает (см. рис. 5.3), что коррозионный и эрозионный износ корпуса насоса приводит к тому, что коэффициент запаса толщины стенки гидравлической части становится меньше единицы. Следовательно, контроль этого параметра необходим в процессе экс-

плутации, и его необходимо включить в число диагностируемых параметров. Остальные параметры могут не контролироваться в течение указанного срока эксплуатации.

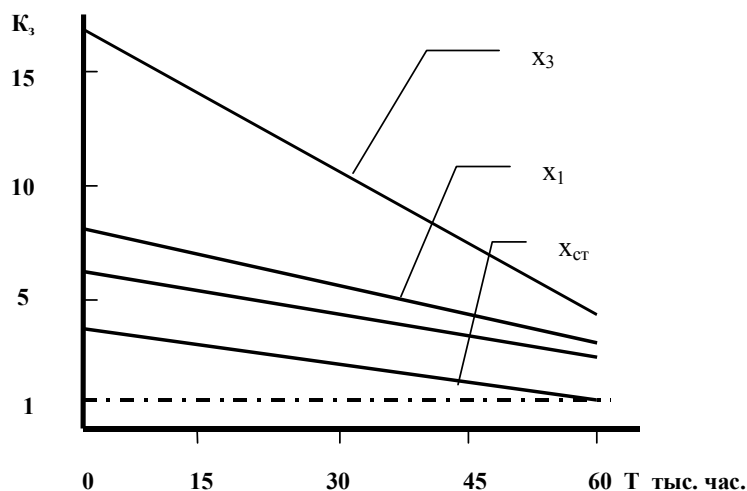


Рис. 5.3. Изменение коэффициента запаса надежности для циркуляционного насоса

### 5.4.3. Топологический метод.

Топологический метод обоснования выбора контролируемых параметров основан на использовании граф-модели и используется чаще всего при решении задач диагностирования. Известно [48], что граф-модель можно использовать для минимизации количества диагностических параметров, выявления наиболее информативных из них и образования рабочего признакового пространства, отражающего возможные неисправности.

Модель создается путем предварительного анализа объекта измерения, во время которого выявляются существенные неисправности, структурные и диагностические параметры и свя-

зи между ними. В результате объект представляется в виде ориентированного графа. Граф-модель является отображением пространства параметров, характеризующих свойства объекта диагностирования, связанные с дефектами.

Построение граф-модели объекта начинается с его условного предварительного представления в виде некоторого множества составных частей, связанных между собой посредством функциональной схемы. За тем производится анализ причинно-следственных связей между параметрами и свойствами объекта. Элементы объекта представляются в виде вершин. После установления связей между ними получается первоначальный ориентированный граф. Он отображает процессы, происходящие в анализируемом объекте, в результате которых осуществляется передача воздействия от одной вершины к другой. Каждая вершина характеризует определенное свойство элемента, представляющее интерес с точки зрения диагностирования. Ребра между вершинами, имеют направление и указывают на влияние свойств, отражаемых одной вершиной, на свойства соседней вершины.

В дальнейшем осуществляется переход от свойств элементов к параметрам, характеризующим эти свойства. В технических объектах количественным оценкам какого-либо свойства соответствуют значения одного или нескольких внутренних или выходных параметров. Важную роль в качестве признаков неисправностей могут сыграть сопутствующие параметры. Это связано с тем, что отказ может вызвать дополнительные процессы в объекте, например, вибрацию или шум.

В процессе перехода от свойств к параметрам производится расширение графа. Каждый из параметров представляется новой вершиной, которая ребрами связана с соответствующими свойствами. Расширенный граф отражает взаимосвязь между параметрами объекта. Ребра, связывающие вершины графа, ориентированы по отношению к главному свойству объекта диагностирования, характеризующему цель его функционирования. Таким образом, получается граф-модель в пространстве параметров. Следует отметить, что эта модель не отражает количественных оценок входных и выходных па-

раметров, а только свидетельствует о существовании связей между ними.

На следующем шаге создания граф-модели производится дополнение уже имеющейся модели наименованиями отказов. Для этого каждому параметру присваивается имя отказа, возникающего при выходе значений параметра за установленные пределы. Множество всех отказов объекта диагностирования выявляется на этапе предварительного обследования

В результате граф-модель в пространстве параметров отображает все известные сведения об объекте измерения и связывает между собой отказы (предельные состояния), свойства и параметры. Она представляет собой топологическое описание объекта, служащее основой для анализа процессов его функционирования и выбора множества диагностических параметров.

На граф-модели параметры отражаются вершинами, которые могут быть четырех типов: 1) ключевые (рис. 5.4.а); 2) тупиковые (рис. 5.4.б); 3) смешанные (рис. 5.4.в); 4) изолированные (рис. 5.4.г). Тип вершины зависит от их связи с соседними вершинами.

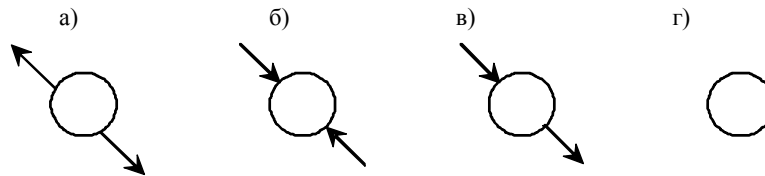


Рис. 5.4. Типы вершин граф-модели СТС, где а – ключевые; б – тупиковые; в – смешанные; г – изолированные

Контроль всех параметров в процессе диагностирования связан с большими затратами времени и средств, которые не всегда оправдываются. Поэтому возникает необходимость минимизации числа точек съема диагностической информации, т. е. отбираются те параметры, которые достаточно полно характеризуют состояние объекта.

Процедура минимизации числа контролируемых параметров основана на использовании граф-модели и предполагает анализ вершин и выделение их минимального числа, характеризующего все отказы. Алгоритм выбора параметров предусматривает отбрасывание тех вершин, которые отображаются в отобранные при минимизации вершины. Из этого следует, что любая вершина исходного множества либо сама содержится в минимизированном подмножестве, либо может быть связана с ним дугой, исходящей из нее же.

Математически эта задача решается отысканием некоторых, так называемых, внешне устойчивых вершин данного ориентированного графа. Внешне устойчивым подмножеством графа согласно [49] называют такое подмножество, которое входит во множество всех его вершин и отражает все независимые диагностические параметры. Для него справедливо высказывание, что для любой вершины графа, не вошедшей во внешне устойчивое подмножество, всегда найдется хотя бы одно отображение этой вершины, входящее в него. Среди нескольких таких подмножеств имеется такое, которое содержит минимальное число вершин, которые и определяют минимальное количество диагностических параметров.

В настоящий момент существует несколько способов поиска минимального числа параметров с помощью граф-моделей:

- алгоритм Бержа [50], основанный на многократных графических построениях,
- логический подход путем проведения большого числа логических операций,
- эвристический алгоритм, использующий свойства независимости отбираемых параметров.

Наиболее приемлемым с точки зрения простоты и уменьшения количества вычислений является эвристический алгоритм [49], приведенный на рис. 5.5. Исходным материалом для его осуществления является матрица смежности графа. Общий вид матрицы приведен на рис.5.6., где  $a_{ij}$  принимает значение, равное 0, если вершины соответствующие параметрам  $x_i$  и  $x_j$ , не являются смежными и значение, рав-

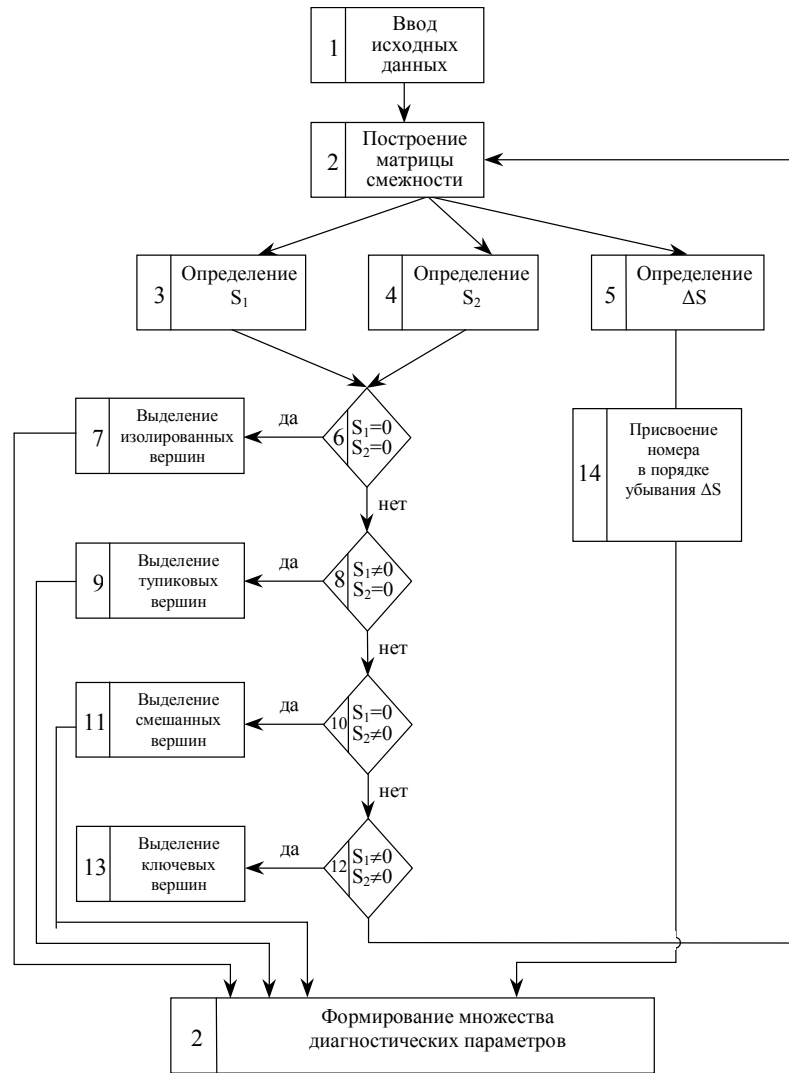


Рис. 5.5. Эвристический алгоритм выбора контролируемых параметров



	$x_1$	$x_2$		$x_n$
$x_1$	0	$a_{12}$		$a_{1n}$
$x_2$	$a_{21}$	0		$a_{2n}$
$x_n$	$a_{n1}$	$a_{n2}$		0

Рис. 5.6. Матрица смежности

ное  $1$ , если они являются смежными. Значения индексов изменяются от  $1$  до  $n$ , где  $n$  -общее число анализируемых параметров.

В матрице смежности единицы в строке любой вершины обозначают дуги, выходящие из нее, а единицы в столбце - дуги заходящие в нее. Нули обозначают тот факт, что анализируемая вершина не связана с другими вершинами. С помощью матрицы смежности легко определить тип вершины. Ключевые вершины имеют столбец, состоящий только из нулевых элементов, но соответствующая строка содержит хотя бы один ненулевой элемент. У тупиковой вершины наоборот - строка нулевая, а столбец ненулевой. Смешанная вершина имеет как в строке, так и в столбце хотя бы один ненулевой элемент. У изолированной вершины и строки и столбцы состоят только из нулевых элементов. Указанное обстоятельство позволяет формализовать анализ графа.

Последовательность действий в алгоритме минимизации заключается в следующем:

1. На основе граф-модели выявляются все параметры объекта измерения и связи между ними (блок 1).
2. Составляется матрица смежности (блок 2).
3. В блоках 3, 4, 5 производится соответственно суммирование столбцов  $S_1$ , строк  $S_2$  по каждому анализируемому параметру и вычисляется разность сумм  $\Delta S$ .

$$S_1 = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (5.23)$$

$$S_2 = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (5.24)$$

4. В блоках 6, 7 производится выделение изолированных вершин, которым соответствуют нулевые строки и столбцы. Им соответствуют полностью независимые диагностические параметры, которые необходимо обязательно включать в сферу контроля.

5. В блоках 8, 9 производится выделение тупиковых вершин, которым соответствуют нулевые строки. Они располагаются в порядке убывания и нумеруются. Параметры, соответствующие тупиковым вершинам, также включаются в число диагностируемых параметров.

6. В блоках 10, 11 та же самая операция производится со смешанными вершинами. Однако в число диагностируемых параметров включаются только те параметры, которые не связаны с тупиковыми вершинами.

7. В блоке 12, 13 формируется множество параметров, характеризующих ключевые вершины. Все они не включаются в сферу контроля, так как они связаны со смешанными или тупиковыми вершинами.

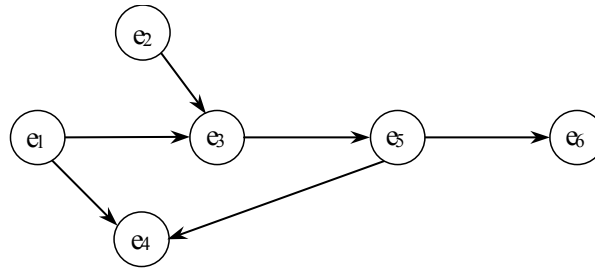
8. В последнем блоке 15 производится окончательное формирование множества диагностируемых параметров.

Таким образом, топологический метод позволяет выделить минимальное множество параметров, необходимых для полной оценки технического состояния объекта диагностирования.

*Пример. Произведем выбор параметров для диагностирования системы пресной воды.*

*Она состоит из цистерны, предназначенной для хранения воды, центробежного насоса, обеспечивающего поступ-*

ление воды в систему, регулирующего клапана, необходимого для поддержания давления воды, поступающей к потребителю и фильтра, служащего для очистки воды. Представив элементы этой системы в виде вершин, обладающих свойствами, соответствующими назначению элементов, получим граф-модель объекта измерения (рис. 5.7). Свойства элементов обозначены  $e_i$

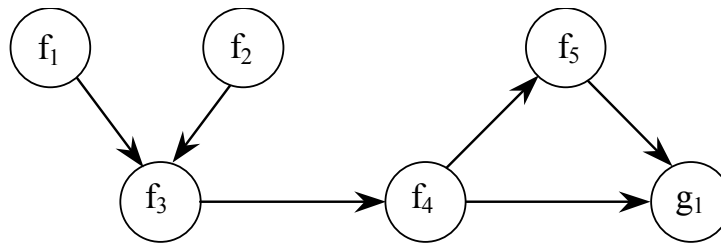


- $e_1$  – поступление пресной воды из цистерны,
- $e_2$  – передача вращающего момента от электродвигателя к насосу,
- $e_3$  – подача воды насосом,
- $e_4$  – слив воды в цистерну от регулятора,
- $e_5$  – поддержание рабочего давления,
- $e_6$  – очистка воды фильтром.

Рис. 5.7 Исходная модель системы пресной воды

Количественными оценками свойств элементов системы соответствуют значения системных и внутренних параметров. Используя соответствие между свойствами элементов системы и ее параметрами, получим граф-модель объекта в пространстве выделенных параметров (рис. 5.8)

Значения системного  $g_1$  и внутренних  $f_1, \dots, f_5$  параметров зависят от изменения структурных параметров, характеризующих техническое состояние объекта. Выделение структурных параметров характерно для решения задач диагностики. Предварительный анализ системы пресной воды как объекта диагностирования позволяет установить перечень структурных параметров.



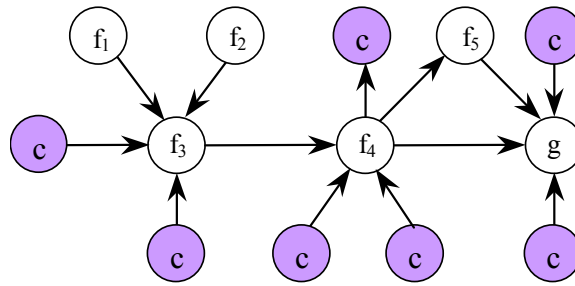
$g_1$  – давление воды, поступающей к потребителю,  
 $f_1$  – расход воды из цистерны,  
 $f_2$  – частота вращения электродвигателя,  
 $f_3$  – производительность насоса,  
 $f_4$  – давление за регулирующим клапаном,  
 $f_5$  – давление воды перед фильтром.

Рис. 5.8. Граф-модель в пространстве параметров.

С учетом структурных параметров граф-модель можно расширить. В расширенном виде (рис. 5.9) вершины модели полностью отражают все параметры, характеризующие техническое состояние и функционирование объекта, а ее ребра указывают на взаимосвязь параметров.

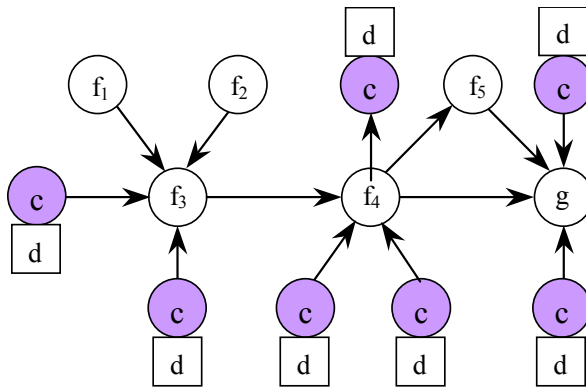
Для наглядности граф-модель можно дополнить изображением возможных отказов объекта, выделенных в процессе его анализа во время предварительного этапа. Это удобно делать, прицепляя описания отказов к вершинам графа, соответствующим характеризующим их параметрам. На рис. 5.10. отказы обозначены в виде квадратиков, и им присвоены символы  $d_i$ .

Граф-модель служит основой для выделения перечня диагностических параметров. Из граф-модели видно, что для выявления всех отказов могут быть использованы 13 параметров. Из них один является системным, пять – внутренними и шесть – структурными параметрами. Задача заключается в том, чтобы количество диагностических параметров было минимальным.



$c_1$  – уровень воды в цистерне,  
 $c_2$  – степень загрязненности воды,  
 $c_3$  – герметичность нагнетающей полости насоса,  
 $c_4$  – техническое состояние качающего узла насоса,  
 $c_5$  – техническое состояние регулирующего клапана,  
 $c_6$  – положение регулировочного узла клапана,  
 $c_7$  – техническое состояние фильтра.

Рис. 5.9. Расширенная граф-модель системы.



$d_1$  – нарушение герметичности цистерны,  
 $d_2$  – загрязнение воды механическими примесями,  
 $d_3$  – нарушение герметичности нагнетающей полости насоса,  
 $d_4$  – износ качающего узла,  
 $d_5$  – неисправность регулирующего клапана,  
 $d_6$  – неправильная регулировка регулятора,  
 $d_7$  – засорение фильтра.

Рис. 5.10. Граф-модель с дополнением отказов.

Для минимизации числа измеряемых параметров воспользуемся эвристическим алгоритмом (рис. 5.3). Исходными данными являются перечень параметров объекта и классификация вершин графа. На основе этих данных составляется матрица смежности. Ее вид представлен на рис. 5.11.

	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$g_1$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$
$f_1$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$f_2$	0		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$f_3$	0	0		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$f_4$	0	0	0		1	1	1	0	0	0	0	0	0
$f_5$	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	0
$g_1$	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
$c_1$	1	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
$c_2$	0	0	0	0	0	1	0		0	0	0	0	0
$c_3$	0	0	1	0	0	0	0	0		0	0	0	0
$c_4$	0	0	1	0	0	0	0	0	0		0	0	0
$c_5$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		0	0
$c_6$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		0
$c_7$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	

Рис. 5.11. Матрица смежности для примера.

Матрица смежности раскрывает связь между вершинами графа. Нули указывают на отсутствие связей, единицы – на наличие связей. Присутствие единицы в строках указывает на направленность связи из вершин, а наличие единицы в столбцах – на направленность связи к данной вершине. Результаты обработки матрицы смежности приведены в таблице 5.7.

Здесь для каждой вершины графа, соответствующей определенному параметру, указаны сумма строк  $S_1$ , столбцов  $S_2$  и разность между  $\Delta S$ . По суммам строк и столбцов в соответствии с эвристическим алгоритмом (рис. 5.5) выделяются изолированные, тупиковые и смешанные вершины. В данном примере изолированные вершины отсутствуют. Тупиковым вершинам соответствует главный параметр  $g_1$ . Во множество смешанных входят вершины, соответствующие параметрам  $f_3, f_1, c_1, f_5, f_4$ . Из них параметр  $f_5$ , характеризую-

ций давление воды перед фильтром, связан с главным параметром  $g_1$ . Поэтому в соответствии с алгоритмом они не включаются в число диагностируемых параметров. Остальные вершины являются ключевыми и параметры, соответствующие им, не включаются в сферу контроля.

Таблица 5.7.

Характеристика матрицы смежности.

Индекс вершины	$S_1 = \sum_{j=1}^s a_{ij}$	$S_2 = \sum_{j=1}^s a_{ij}$	$S_k = S_2 - S_1$
$f_1$	1	1	0
$f_2$	1	0	-1
$f_3$	1	4	3
$f_4$	2	3	1
$f_5$	1	1	0
$g_1$	0	4	4
$c_1$	1	1	0
$c_2$	1	0	-1
$c_3$	1	0	-1
$c_4$	1	0	-1
$c_5$	1	0	-1
$c_6$	1	0	-1
$c_7$	1	0	-1

Таким образом, к числу диагностических параметров следует отнести четыре параметра:

$g_1$  – давление воды, поступающей к потребителю,

$f_3$  – производительность насоса,

$f_1$  – расход воды из цистерны,

$f_4$  – давление воды за регулирующим клапаном.

Приведенный пример иллюстрирует выбор диагностических параметров для глубины диагностирования, необходимой для выявления неисправного элемента системы. Более глубокое диагностирование требует включения в сферу контроля дополнительных параметров с расширением граф-модели.

#### 5.4.4. Аналитический метод.

Аналитический метод основан на использовании математических моделей в виде системы алгебраических или дифференциальных (для динамических объектов) уравнений. Такие модели характерны для большинства корабельных технических средств, таких как турбомшины и дизеля различного назначения, насосы и теплообменники, и основаны на закономерностях термодинамики, газодинамики, гидравлики. В качестве уравнений можно использовать и регрессионные уравнения.

Уравнения устанавливают связь между показателями, рассчитываемыми при проектировании, и параметрами, измеряемыми при эксплуатации. В состав уравнений должны обязательно входить величины, характеризующие назначение объекта измерения (системные параметры) и отражающие надежность и качество его функционирования, а также переменные, изменяющиеся в процессе эксплуатации или регулируемые при протекании технологического процесса. Все эти параметры должны быть определены на предварительном этапе выбора контролируемых параметров.

От вида математической модели зависит результат выбора. Если модель линейная, то отобранная совокупность параметров может использоваться на любом режиме использования оборудования. Если объекты измерения имеют нелинейную модель, то подобные рекомендации недопустимы. Для них каждый режим работы оборудования характеризуется своей совокупностью контролируемых параметров, а в пост управления должны выноситься приборы, измеряющие полную совокупность параметров для всех режимов.

Пусть имеется  $h$  уравнений математической модели объекта измерения



$$\begin{aligned}
f_1(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0 \\
f_2(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0 \\
&\dots \\
f_h(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0
\end{aligned}
\tag{5.25}$$

Для конкретной ситуации математическую модель можно представить в линейной форме методом малых отклонений [51]. После линеаризации они имеют вид:

$$\begin{aligned}
a_{11}p_1 + a_{12}p_2 + \dots + a_{1n} &= 0 \\
a_{21}p_1 + a_{22}p_2 + \dots + a_{2n} &= 0 \\
&\dots \\
a_{h1}p_1 + a_{h2}p_2 + \dots + a_{hn} &= 0
\end{aligned}
\tag{5.26}$$

Здесь величины  $p_1, p_2, \dots, p_n$  – параметры состояния объекта измерения.

Предположим, что с помощью существующих средств измерения можно найти значения  $m$  непосредственно измеряемых величин  $x_1, x_2, \dots, x_m$ . Остальные  $h=n-m$  величин находятся косвенным путем. Если выражений для этого не достаточно ( $m < n-h$ ), то состояние объекта измерения нельзя определить однозначно. Необходимо либо искать дополнительно уравнения, например, в виде регрессионных уравнений, либо изыскивать способы измерения других физических величин. Если уравнений в математической модели больше, чем это необходимо для косвенного измерения ( $m > n-h$ ), то модель обладает некоторой избыточностью, т.к. часть параметров можно измерить как прямым, так и косвенным путем. Число таких параметров равно

$$k = m - (n - h) \tag{5.27}$$

Следовательно,  $k$  параметров дают избыточную информацию о состоянии объекта измерения. Этим можно восполь-

зоваться либо для уменьшения числа непосредственно измеряемых физических величин, либо для дублирования и повышения достоверности измерения.

После определения количества параметров, необходимых для определения состояния объекта измерения появляется возможность уменьшить число параметров, выделенных на предварительном этапе. Уменьшение числа непосредственно измеряемых величин можно достигнуть четырьмя способами.

1. Путем отбора параметров по результатам их ранжирования, произведенного экспертами.

2. С использованием критериев информативности или ценности информации.

3. Путем минимизации погрешности косвенного измерения важнейших обобщенных показателей, которые можно оценить с помощью различных непосредственно измеряемых величин.

4. Путем выбора базиса, т.е. группы независимо измеряемых параметров, обеспечивающих полную оценку погрешности состояния. Здесь каждая базисная группа параметров полностью определяет состояние объекта измерения.

Следует иметь в виду, что при использовании четвертого способа таких групп может быть несколько. Их количество определяется числом сочетаний  $C_n^{n-h}$  (где  $n$  – общее количество параметров,  $h$  – количество косвенно измеряемых величин). Выбирается та группа, при измерении параметров которой погрешность оценки состояния минимальна.

Из предложенных способов наиболее предпочтительными является последний способ, лишенный субъективизма при отборе параметров. В качестве критерия для выбора конкретной группы параметров может быть использован любой из метрологических показателей, например, погрешность оценки состояния объекта измерения в целом. Но он является и наиболее трудоемким.

**Пример.** *Необходимо выбрать контролируемые параметры для теплообменного аппарата. Произведем его всеми предложенными способами.*

Состояние теплообменника характеризуется четырьмя параметрами (рис. 5.12):

- температура нагреваемой среды  $t_1'$  на входе в аппарат,
- температура нагреваемой среды  $t_1''$  на выходе из аппарата,
- температуры теплоносителя  $t_2'$  на входе в аппарат,
- температуры теплоносителя  $t_2''$  на выходе из аппарата.

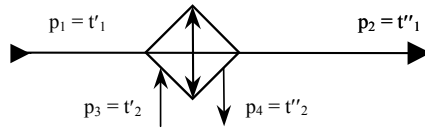


Рис. 5.12. Параметры теплообменного аппарата.

В прямоточных и противоточных аппаратах без изменения агрегатного состояния теплоносителей на стационарном режиме теплопередача характеризуется двумя линейными уравнениями:

$$\begin{aligned} t_1'' &= t_1' - (t_1' - t_2')\Pi \\ t_2'' &= t_2' - (t_1' - t_2')\Pi \cdot \frac{w_1}{w_2} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Величина  $\Pi$  табулирована [52] в зависимости от отношений

$$\frac{w_1}{w_2} \text{ и } \frac{kF}{w_1},$$

где  $w_1, w_2$  — водяные эквиваленты,  $F$  — площадь поверхности теплообмена. Отметим, что для каждого теплообменного аппарата характерны свои конкретные значения величин  $w_1, w_2$  и  $F$ .

Предварительный анализ объекта измерения показывает, что для оценки правильности функционирования теплообменника необходимо измерять все четыре параметра. Температура выхода нагреваемой среды  $t_2''$  является системным

параметром. Для выработки управляющего воздействия необходимо контролировать температуру на входе нагреваемой среды  $t_2'$  и температуры на входе  $t_1'$  и выходе  $t_1''$  теплоносителя. Из математической модели объекта измерения (5.28) следует, что два уравнения связывают четыре параметра. Следовательно, минимальное количество параметров непосредственного измерения, образующих пространство наблюдения равно двум.

Они позволяют косвенным путем определить оставшиеся две физические величины. Количество групп параметров, каждая из которых позволяет осуществлять наблюдение за теплообменом равно шести

1.  $(t_1', t_2')$ , 2.  $(t_1', t_2'')$ , 3.  $(t_1', t_1'')$ , 4.  $(t_2', t_2'')$ , 5.  $(t_2', t_1'')$ .
6.  $(t_2'', t_1'')$ .

Для оценки технического состояния аппарата при загрязнении или засолении поверхности теплообмена необходимо выделить дополнительные диагностические параметры. К ним можно отнести коэффициент теплопередачи  $F$ , значение которого изменяется в процессе эксплуатации. Если для оценки технического состояния использовать параметрический метод, то необходимо оценивать этот коэффициент. Выражение для коэффициента теплопередачи имеет вид:

$$K = \ln \frac{t_1'' - t_2''}{t_1' - t_2'} / \left( \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} \right) F \quad (5.29)$$

В этом случае математическая модель объекта измерения (5.28) дополняется выражением (5.29) и состоит уже из трех уравнений, которые связывают между собой пять параметров. Следовательно, минимальное количество параметров непосредственного измерения должно быть равным трем, а количество групп параметров, каждая из которых позволяет осуществить наблюдение за теплообменом равно трем

1.  $(t_1', t_2', t_2'')$ , 2.  $(t_1', t_1'', t_2'')$ , 3.  $(t_2', t_1'', t_2'')$ .

Произведем окончательный выбор контролируемых параметров каждым из предложенных четырех способов.

1. Ранжирование параметров экспертами позволяет выделить наиболее важный параметр –  $t_2''$ , который несет информацию о качестве функционирования теплообменника и поэтому является системным параметром. Остальные три параметра принципиально равноценны и дальнейшая их расстановка по степени важности невозможна. Поэтому окончательный отбор контролируемых параметров произвести этим способом нельзя.

2. Критерии информативности для выбора параметров непосредственного измерения также не позволяют решить задачу, т.к. все четыре физические величины являются однородными, для их измерения используются одинаковые приборы, обладающие одной и той же стоимостью, габаритами, чувствительностью и т.д.

3. Третий способ предполагает осуществить выбор непосредственно измеряемых параметров, дающий наименьшую погрешность измерения системного параметра  $t_2''$ . Его можно измерить либо непосредственно, либо косвенным путем. Погрешность косвенного измерения можно найти с помощью выражения (3.16) или (3.17). Частные производные, необходимые для расчета, находятся из уравнений (5.28), которые являются линейными и в общем виде их можно записать в виде

$$y = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 \quad (5.30)$$

Для линейного уравнения абсолютная погрешность косвенного измерения будет равна

$$\Delta y = c_1 \cdot \Delta x_1 + c_2 \cdot \Delta x_2 \quad (5.31)$$

если погрешности измерения  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$  коррелированы. В противном случае она определяется путем геометрического сложения

$$\Delta y = \sqrt{c_1^2 \cdot \Delta x_1^2 + c_2^2 \cdot \Delta x_2^2} \quad (5.32)$$

В таблице 5.8. приведены результаты расчетов погрешностей измерения температуры  $t_2''$ , оцениваемой косвенным путем.

Из таблицы видно, что для непосредственного измерения можно использовать шесть групп параметров, каждая из которых включает в себя два параметра непосредственного измерения. Из выражений (5.28) следует, что для оценки косвенно измеряемой величины  $t_2''$  возможны три способа измерения с помощью двух непосредственно измеряемых параметров: первый, третий и пятый (см. табл. 5.8).

Для определенности примем  $\frac{w_1}{w_2} = 1$ ,  $\frac{kF}{w_1} = 0,5$ ,  $\Pi = 0,33$ ,

значения которых зависят от конструктивных особенностей теплообменника. В таблице приведены формулы для расчета частных производных  $C_1$  и  $C_2$ , участвующих в расчете погрешности. Эти выражения находятся путем преобразования уравнений (5.28) и отличаются друг от друга комбинацией измеряемых параметров. С целью упрощения расчетов принято, что погрешности непосредственного измерения температур равны  $\Delta x = 1^\circ\text{C}$  и коррелированы между собой ( $\rho = 1$ ).

Из расчетов следует, что системный параметр температуры нагреваемой среды можно определить тремя способами с одинаковой точностью  $\Delta t_2'' = 1^\circ\text{C}$ :

- непосредственным измерением;
- косвенным путем, измеряя  $t_1'$  и  $t_2'$ ;
- косвенным путем, измеряя  $t_2''$  и  $t_1''$ .

В остальных способах погрешность косвенного измерения существенно выше, и их нельзя рекомендовать для использования.

Таким образом, путем оценки погрешности измерения косвенно измеряемых величин можно уменьшить неопределенность выбора параметров для наблюдения за состоянием теплообменного аппарата. Однако неопределенность остается, т.к. три способа имеют одинаковую погрешность измерения системного параметра.

Таблица 5.8.

№ группы	Наименование непосредственно измеряемых параметров	Наименование косвенно измеряемых параметров	Формулы для оценки частных производных	Погрешность косвенного измерения	Погрешность оценки состояния
1	2	3	4	5	6
1.	Температура теплоносителя на входе $t_1'$	Температура теплоносителя на выходе $t_1''$	$C_1 = 1 - \Pi$ $C_2 = \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}$	1	4
	Температура нагреваемой среды на входе $t_2'$	Температура нагреваемой среды на выходе $t_2''$	$C_1 = \Pi$ $C_2 = 1 - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}$	1	
2.	Температура теплоносителя на входе $t_1'$	Температура теплоносителя на выходе $t_1''$	$C_1 = \frac{1 - \Pi - \Pi^2 \cdot \frac{w_1}{w_2}}{1 - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$ $C_2 = \frac{\Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}{1 - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$	1,32	5,26
	Температура нагреваемой среды на выходе $t_2''$	Температура нагреваемой среды на входе $t_2'$	$C_1 = \frac{\Pi}{1 - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$ $C_2 = \frac{1}{1 - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$	1,94	

1	2	3	4	5	6
3.	Температура теплоносителя на входе $t_1'$	Температура нагреваемой среды на входе $t_2'$	$C_1 = \frac{\Pi - 1}{\Pi}$ $C_2 = \frac{\Pi + \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2} - 1}{\Pi}$	3,24	10,48
	Температура теплоносителя на выходе $t_1''$	Температура нагреваемой среды на выходе $t_2''$	$C_1 = \frac{1}{\Pi}$ $C_2 = \frac{1 - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}{\Pi}$	5,24	
4.	Температура нагреваемой среды на входе $t_2'$	Температура теплоносителя на входе $t_1'$	$C_1 = \frac{\Pi + \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2} - 1}{\Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$ $C_2 = \frac{1 - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}{\Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$	3,24	10,16
	Температура нагреваемой среды на выходе $t_2''$	Температура теплоносителя на выходе $t_1''$	$C_1 = \frac{1 - \Pi}{\Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$ $C_2 = \frac{1}{\Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$	5,22	



1	2	3	4	5	6
5.	Температура нагреваемой среды на входе $t_2'$	Температура нагреваемой среды на выходе $t_2''$	$C_1 = \frac{\Pi + \Pi \frac{w_1}{w_2} - 1}{\Pi - 1}$ $C_2 = \frac{\Pi}{\Pi - 1}$	1	5,94
	Температура теплоносителя на выходе $t_1''$	Температура теплоносителя на входе $t_1'$	$C_1 = \frac{\Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}{1 - \Pi}$ $C_2 = \frac{1}{1 - \Pi}$	2,94	
6.	Температура нагреваемой среды на выходе $t_2''$	Температура нагреваемой среды на входе $t_2'$	$C_1 = \frac{1 - \Pi}{1 - \Pi - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$ $C_2 = \frac{\Pi}{1 - \Pi - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$	2,78	7,56
	Температура теплоносителя на выходе $t_1''$	Температура теплоносителя на входе $t_1'$	$C_1 = \frac{\Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}{1 - \Pi - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$ $C_2 = \frac{1 - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}{1 - \Pi - \Pi \cdot \frac{w_1}{w_2}}$	2,78	

4. Четвертый способ основан на выборе той группы непосредственно измеряемых параметров, при использовании которой погрешность оценки состояния теплообменного аппарата минимальна. Для определения погрешности оценки состояния можно сложить все погрешности прямого и косвенного измерения, а можно воспользоваться выражениями (3.34).

*В таблице 5.8. приведены результаты расчета погрешности оценки состояния для каждой группы непосредственно измеряемых параметров. Для рассматриваемого теплообменника минимальная погрешность оценки состояния имеет место при непосредственном измерении температуры теплоносителя и температуры нагреваемой среды на входе в теплообменный аппарат  $t'_1$  и  $t'_2$ . Наихудшую точность обеспечивает измерение температуры теплоносителя на входе и выходе теплообменного аппарата  $t'_1$  и  $t''_1$ , причем в последнем случае погрешность оценки состояния увеличивается более чем в 2,5 раза. Интересно отметить, что непосредственно измерение температуры нагреваемой среды на входе для рассматриваемого теплообменника не эффективно при любом сочетании с другим измеряемым параметром. Во всех трех случаях погрешность оценки состояния теплообменника увеличивается при одновременном измерении  $t'_1$  на 30%,  $t''_1$  на 87% и  $t'_2$  на 150%.*

*Выбор непосредственно измеряемых параметров для диагностирования теплообменника параметрическим способом производится аналогичным способом, с той лишь разницей, что коэффициент теплопередачи  $K$  всегда находится только путем косвенного измерения.*

## **6. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.**

Рассмотренные выше методы обоснования выбора контролируемых параметров и точности их измерения показывают, что часто возможен выбор нескольких вариантов решения задач метрологического обеспечения. Среди возможных вариантов обоснования необходимо найти наилучший с некоторой точки зрения вариант, который дает возможность либо сэкономить ресурсы, затрачиваемые на измерения, либо добиться максимальной точности измерения при ограничениях на ресурсы.

### **6.1 Математическая постановка задачи.**

По своему существу задачу выбора контролируемых параметров (системы координат) и точности их измерения можно назвать задачей выбора способа измерения или задачей наблюдения. Решение этой задачи позволяет сформулировать требования к измерению наблюдаемых физических явлений. Если целью решения задачи является стремление получить максимальную выгоду при организации измерений при ограниченных ресурсах, то ее можно отнести к задачам оптимизации. Поиск оптимального способа измерения подразумевает решение следующих задач.

1. Прямая задача. Для данной совокупности параметров прямого и косвенного измерения и при ограниченных ресурсах найти такие допустимые отклонения значений параметров при прямом измерении, при которых суммарная погрешность измерения всех параметров является минимальной.

2. Обратная задача. Для данной совокупности параметров прямого косвенного измерения и при заданной погрешности косвенного измерения найти такие допустимые отклонения значений параметров при прямом измерении, при котором потребление ресурса минимально.

3. Выбор такой оптимальной системы координат, в которой либо погрешность оценки состояния, либо потребление заданного ресурса минимальны.

При решении прямой задачи в качестве функционала можно принять выражение для погрешности оценки состояния объекта измерения [53] или для погрешности косвенного измерения [54]. Ограничениями будут служить уравнения связи, которые отражают возможное распределение располагаемых ресурсов для решения задачи. В обратной задаче функционалом является одно из уравнений связи, а выражение, используемое в прямой задаче в качестве функционала – ограничением. В том и в другом случае в общем виде это задачи нелинейного программирования со специфическими квадратичными и сепарабельными функциями [55]. Положительная определенность выражений (3.23) и (3.30) и наличие у них глобального минимума позволяют найти условный минимум функционала.

Выбор оптимальной системы координат осуществляется путем перебора различных вариантов и сравнения их по численным значениям принятых функционалов. Наилучшей считается та система координат, для которой значение функционала минимально.

Принципиально одновременно может быть обоснованы как выбор параметров, так и точность их измерения. В этом случае можно говорить о выборе оптимального способа измерения.

Постановка задачи выбора оптимального способа измерения может быть сформулирована следующим образом.

Пусть имеем ( $I$  функционалов) целевую функцию от  $m$  переменных  $\delta_1, \dots, \delta_m$ , которая задана в некоторой области  $D$  пространства переменных. Для каждой  $k$  – той из  $I$  систем ко-

ординат целевая функция принимает численные значения, равные функционалам

$$\delta = \varphi_k(\delta_1, \dots, \delta_m) \quad k = 1, \dots, l \quad (6.1)$$

Область  $D$  определяется положительными значениями переменных

$$\delta_1 > 0, \dots, \delta_m > 0 \quad (6.2)$$

Кроме того, на переменные  $\delta_1, \dots, \delta_m$  наложены еще  $\rho$  дополнительных условий,  $\rho < m$ .

$$\psi_r(\delta_1, \dots, \delta_m) = 0 \quad r = 1, \dots, \rho \quad (6.3)$$

Пусть значения переменных  $\delta_1, \dots, \delta_m$  определяют внутреннюю точку области  $D$ . Каждый из  $l$  функционалов (6.1) в точке  $(\delta_1^0, \dots, \delta_m^0)$  имеет условный минимум, если неравенство

$$\varphi_k(\delta_1, \dots, \delta_m) > \varphi_k(\delta_1^0, \dots, \delta_m^0)$$

выполняется в некоторой окрестности точки  $(\delta_1^0, \dots, \delta_m^0)$  при условии, что  $(\delta_1, \dots, \delta_m)$  и  $(\delta_1^0, \dots, \delta_m^0)$  удовлетворяют уравнениям связи (6.3). Минимум определяет такие погрешности измерения  $(\delta_1^0, \dots, \delta_m^0)$  параметров в  $k$ -той системе координат, при которых соответствующий функционал имеет минимальное значение.

Перебирая все доступные для технической реализации системы координат, получим  $l$  условных минимумов целевой функции (6.1). Оптимальной системой координат будет такая, которая имеет наименьший минимум функционала. Критерием оптимальной системы координат является

$$L = \min_k \min_D \psi(\delta_1, \dots, \delta_m) \quad (6.4)$$

Таким образом, задача выбора оптимального способа измерения сводится к поиску таких физических величин, измеряемых прямым способом, для которых условный минимум функционала (6.1) является минимальным. Перечень минимального количества параметров, которые можно измерять с такой погрешностью, образует оптимальную совокупность измеряемых параметров, как по их количеству, так и по их виду. Оптимальность по количеству достигается тем, что предполагается измерять минимальное число только независимых параметров, а оптимальность по виду параметров вытекает из физических уравнений (2.26) взаимосвязи параметров. Значения погрешностей, удовлетворяющих условному минимуму, составляют оптимальные требования по допустимым отклонениям параметров.

Сущность оптимизации здесь заключается том, что проводится такое перераспределение ресурсов между погрешностями измерения контролируемых величин, при котором суммарная погрешность измерения минимальна, а значение суммарного ресурса не превосходит требуемый уровень. Уместно напомнить в соответствии с постановкой задачи (6.3) количество ресурсов  $\rho$  может быть больше одного, но не больше числа независимых переменных  $m$ . Однако в дальнейшем изложении в целях обеспечения наглядности результатов будет рассматриваться только один ограничивающий ресурс.

Аспект оптимизации определяется уравнениями связи (6.3). В том случае, если они характеризуют стоимость, то выбранный способ измерения за счет перераспределения стоимостей отдельных приборов обеспечивает заданное значение стоимости всей системы контроля при минимальной суммарной погрешности измерения. Если они характеризуют потери эффективности управления, то осуществляется минимизация суммарной погрешности измерения при заданном значении потерь.

В зависимости от целей оптимизации для решения задачи можно использовать различные функционалы и любые ограничения на точность измерения физических величин и на

выбор измеряемых параметров. Рассмотрим наиболее типичные варианты решения задачи, которые позволяют обосновать выбор количества и вида параметров и одновременно точность их измерения.

С целью обеспечения наглядности для решения задачи воспользуемся классическим методом множителей Лагранжа [13]. Его использование дает возможность определить условный минимум действительной функции с переменными, подчиненными достаточно гладким условиям. Классический подход к решению оптимизационной задачи оказывается удобным для нахождения оптимального решения в аналитическом виде. Аналитические выражения определяют результат оптимального решения через различные коэффициенты, встречающиеся в функционале и в уравнениях связи. Однако классический подход ограниченно применим для получения численных результатов из-за наложения условий (6.2). Для решения задачи с неотрицательными переменными, а также в тех случаях, когда некоторые ограничения заданы в форме неравенств, следует применять численные методы программирования [13].

В заключение необходимо сделать несколько замечаний о применимости предлагаемых методов оптимизации. Коэффициенты функционала в прямой задаче определяются через частные производные и их значения целиком зависят от математической модели, описывающей процессы, происходящие в объекте измерения. Следовательно, результат решения задачи зависит от вида математической модели и от ее адекватности. Для линейных объектов решение будет справедливо во всей области изменения параметров. Для нелинейных объектов требования к точности измерения должны учитывать условия и режим работы энергетической установки. Погрешность математической модели вносит некоторую неопределенность в решение задачи, но в пределах инженерных расчетов рекомендации по требованиям к точности измерения будут близки к идеальным.

## 6.2. Минимизация погрешности совместных измерений при ограниченных ресурсах.

Термин “минимальная погрешность” сам по себе абсурден, т.к. минимальная погрешность равна нулю. Однако абсолютно точных измерений не бывает. Измерительный эксперимент зависит от различных обстоятельств, не позволяющих получить высокую точность результата измерения. Поэтому в определенных условиях, которые создаются при ограниченных ресурсах: стоимости, надежности, массе и других, можно добиться максимальной точности измерения, т.е. минимальных погрешностей.

### 6.2.1. Обеспечение оптимальной суммарной погрешности совместных измерений.

Суммарная погрешность совместных измерений это сумма погрешностей измерения всех параметров, участвующих в измерительном эксперименте, т.е. физических величин, измеряемых как непосредственно, так и косвенным путем. В относительном виде она определяется выражением (3.33)

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^m \delta_i^2 + \sum_{j=1}^h \delta_{y_j}^2$$

Это выражение можно записать в другом виде (3.24), используя погрешности только непосредственно измеряемых параметров

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^m G_{ii} \delta_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m G_{ij} f_{ij} \delta_i \delta_k$$



Напомним, что  $r_{ij}$  – коэффициент корреляции между переменными  $\delta_i, \delta_j$ ; а  $G_{ij}$  – компоненты метрического тензора (см. п. 2.3.).

Для решения прямой задачи определения оптимального способа измерения воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. В качестве функционала возьмем выражение (3.24), а в качестве ограничений (см. 5.3) примем линейное или гиперболическое уравнение связи:

а) Линейное уравнение связи.

Линейное уравнение связывает расходуемый ресурс  $R$  с погрешностями измерения  $\delta_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) выражением вида

$$a_1\delta_1 + \dots + a_m\delta_m = R \quad (6.5)$$

где  $a_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) – коэффициенты, отражающие степень влияния точности измерения на значение ресурса.

Оно применимо в тех случаях, когда от точности измерения зависит эффективность управления или имеет место приоритет одного параметра перед другим (см. п. 5.3.).

Составим функцию Лагранжа

$$F = \sum_{i=1}^m \delta_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m G_{ij} r_{ij} \delta_i \delta_k + \lambda(a_1\delta_1 + \dots + a_m\delta_m - R), \quad (6.6)$$

где  $\lambda$  – неопределенный множитель Лагранжа.

Функцию (6.6) следует исследовать на безусловный экстремум. Для этого необходимо взять производную от этой функции по каждой переменной  $\delta_i$  и приравнять их нулю. Получим  $m$  уравнений вида

$$\frac{\partial F}{\partial \delta_1} = 0 \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial \delta_m} = 0 \quad (6.7)$$

Добавим к ним еще одно уравнение связи (6.5.) получим систему  $(m+1)$  уравнений с таким же количеством неизвестных  $\delta_1, \dots, \delta_m, \lambda$ .

$$\begin{aligned}
& a_1\delta_1 + \dots + a_i\delta_i + \dots + a_m\delta_m = R \\
& G_{11}\delta_1 + \dots + G_{1i}\Gamma_{1i}\delta_i + \dots + G_{1m}\Gamma_{1m}\delta_m = 0 \\
& G_{21}\Gamma_{21}\delta_1 + \dots + G_{2i}\Gamma_{2i}\delta_i + \dots + G_{2m}\Gamma_{2m}\delta_m = 0 \\
& \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
& G_{m1}\Gamma_{m1}\delta_1 + \dots + G_{mi}\Gamma_{mi}\delta_i + \dots + G_{mm}\delta_m = 0
\end{aligned} \tag{6.8}$$

Система линейных уравнений (6.8) имеет единственное решение, которое с учетом того, что правая часть кроме первого уравнения равна нулю, можно записать в общем виде

$$\begin{aligned}
\delta_1^0 &= R \frac{A_{11}}{\sum_{i=1}^m a_i A_{1i}} \dots \delta_i^0 = R \frac{A_{1i}}{\sum_{i=1}^m a_i A_{1i}} \dots \\
\delta_m^0 &= R \frac{A_{1m}}{\sum_{i=1}^m a_i A_{1i}}
\end{aligned} \tag{6.9}$$

где  $A_{1i}$  - алгебраические дополнения определителя системы уравнений (6.8.) по элементам  $i$ -того столбца. Оно равно

$$A_{1i} = \begin{vmatrix} G_{11} & G_{12}\Gamma_{12} & G_{1i-1}\Gamma_{1i-1} & G_{1i+1}\Gamma_{1i+1} & G_{1m}\Gamma_{1m} & a_1 \\ G_{21}\Gamma_{21} & G_{22} & G_{2i-1}\Gamma_{2i-1} & G_{2i+1}\Gamma_{2i+1} & G_{2m}\Gamma_{2m} & a_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{m1}\Gamma_{m1} & G_{m2}\Gamma_{m2} & G_{mi-1}\Gamma_{mi-1} & G_{mi+1}\Gamma_{mi+1} & G_{mm} & a_m \end{vmatrix} \tag{6.10}$$

Для иллюстрации полученных результатов рассмотрим частные случаи использования выражений (6.9) для расчета оптимальных погрешностей измерения при линейных уравнениях связи.

В научно технической литературе [1, 12, 56] формулы для оценки погрешности косвенного измерения часто используют при предположении об отсутствии статистической связи между параметрами, т.е. при  $\Gamma_{ij} = 0$ . Как показано в п. 3 наличие корреляционной связи между погрешностями измерения

увеличивает погрешность оценки как величины, измеряемой косвенным путем, так и состояния в целом. Это приводит к уменьшению информации, поступающей к оператору. (Здесь следует помнить, что наличие корреляционной связи между измеряемыми величинами, а не погрешностями приводит к увеличению информации об объекте измерения.)

Расчет суммарной погрешности при  $r_{ij} = 0$  интересен тем, что позволяет оценить максимально возможную точность измерения. При слабой корреляционной связи предположение о независимости переменных может служить первым шагом для ориентировочной оценки погрешности измерения, близкой к оптимальному значению.

Условие независимости переменных существенно упрощает расчетные формулы. С учетом  $r_{ij} = 0$  в формуле (6.10) для расчета алгебраического дополнения остаются только компоненты метрического тензора при квадратах переменных  $G_{ij}$

$$A_{ii} = (-1)^{i+1} \begin{vmatrix} G_{11} & 0 & \cdots & 0 & a_1 \\ 0 & G_{22} & \cdots & 0 & a_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & G_{mm} & a_m \end{vmatrix} \quad (6.11)$$

Подставляя значения  $A_{ij}$ , рассчитанные по формуле (6.11), в выражение (6.10) окончательно получим формулу для определения оптимальных погрешностей измерения при  $r_{ij} = 0$

$$\delta_i^0 = R \frac{\frac{a_i}{G_{ii}}}{\sum_{i=1}^m \frac{a_i^2}{G_{ii}}} \quad (6.12)$$

Для выяснения физической сущности процедуры оптимизации найдем выражения для расчетов погрешностей при непосредственном измерении двух параметров.

Общий вид выражения (3.24) для расчета погрешностей в этом случае имеет вид

$$\delta^2 = g_{11}\delta_1^2 + 2G_{12}r_{12}\delta_1\delta_2 + G_{22}\delta_2^2 \quad (6.13)$$

Линейная функция потерь (6.5) отражается уравнением связи

$$\psi(\delta_1, \delta_2) = a_1\delta_1 + a_2\delta_2 - R = 0 \quad (6.14)$$

Система уравнений (6.8) превращается в систему 3-х уравнений

$$\begin{aligned} a_1\delta_1 + a_2\delta_2 + 0 &= R \\ 2G_{11}\delta + 2G_{12}r_{12}\delta + a_1\lambda &= 0 \\ 2g_{12}r_{12}\delta + 2G_{22}\delta + a_2\lambda &= 0 \end{aligned}$$

Найдем выражения для алгебраических дополнений  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ .

$$A_{11} = \begin{vmatrix} 2G_{12}r_{12} & a_1 \\ 2G_{22} & a_2 \end{vmatrix} = 2(G_{12}r_{12}a_2 - g_{22}a_1)$$

$$A_{12} = \begin{vmatrix} 2G_{11} & a_1 \\ 2G_{12}r_{12} & a_2 \end{vmatrix} = 2(G_{12}r_{12}a_1 - G_{11}a_2)$$

Оптимальные погрешности измерения обоих параметров в соответствии с (6.12) определяются формулами

$$\delta_1^0 = R \frac{G_{12}r_{12}a_2 - G_{22}a_1}{2G_{12}r_{12}a_1a_2 - G_{22}a_1^2 - G_{11}a_2^2} \quad (6.15)$$

$$\delta_2^0 = R \frac{G_{12}r_{12}a_1 - G_{11}a_2}{2G_{12}r_{12}a_1a_2 - G_{22}a_1^2 - G_{11}a_2^2}$$

При отсутствии корреляции между погрешностями измерения, т.е.  $r_{ij} = 0$  формулы еще более упрощаются

$$\delta_1^0 = R \frac{G_{22}a_1}{G_{22}a_1^2 + G_{11}a_2^2}$$

$$\delta_2^0 = R \frac{G_{11}a_2}{G_{22}a_1^2 + G_{11}a_2^2}$$
(6.16)

Отсюда следует, что физическая сущность решения оптимизационной задачи состоит в следующем. Требования к точности измерения параметра  $x_i$  должны быть тем выше, чем больше значение для компоненты метрического тензора  $G_{ij}$ . Это связано с тем, что ее значение характеризует степень сжатия координаты, соответствующей данному параметру, в пространстве наблюдения. Чем больше сжатие, тем большая точность необходима при измерении. В тоже время, чем больше весовой коэффициент имеет анализируемый параметр в распределении ресурса, тем большая погрешность допустима при его измерении. При отсутствии приоритета в распределении ресурса между параметрами ( $a_1 = a_2$ ) точность их измерения определяется только метрическими свойствами объекта измерения.

Анализируя метрические свойства, следует помнить, что значения компонент метрического тензора зависят от количества физических величин, которые измеряются косвенным путем. Это наглядно видно из выражений (2.30) и (2.31), приведенных в п. 2.3.

*Пример. Известно, что при управлении котлотурбинной энергетической установкой изменение параметров пара оказывает влияние на экономичность ее функционирования. Состояние пара характеризуют четыре параметра: температура, давление, энтальпия и энтропия.*

*Примем изменение коэффициента полезного действия под влиянием параметров пара за ресурс  $R = \Delta\eta$ , характеризующий потери эффективности управления. В этом случае уравнение связи (6.5) имеет вид*

$$a_1 \delta_{\Delta p} + a_2 \delta_{\Delta t} = \Delta \eta$$

где  $a_p = \frac{\partial \eta}{\partial p} \frac{p}{\eta}$  – коэффициент влияния давления пара на

к.п.д.;

$a_t = \frac{\partial \eta}{\partial t} \frac{t}{\eta}$  – коэффициент влияния температуры пара на к.п.д.

Предположим, что корреляционная связь между погрешностями измерения температуры и давления пара отсутствует. Тогда расчет оптимальных погрешностей измерения этих параметров можно произвести по формуле (6.16). Пусть параметры пара равны  $p = 5 \text{ Мпа}$  и  $t = 300^\circ \text{С}$ . Для этого состояния пара имеем

$$a_t = 0,2 \quad a_p = 0,1 \quad G_{11} = 1,16 \quad G_{22} = 1,004$$

При допустимом отклонении к.п.д. равном 1% получим оптимальные значения погрешности измерения параметров пара

$$\delta_p = 3,9\% \quad \delta_t = 2,2\%,$$

которые обеспечивают отклонение к.п.д. не более 1%, при этом погрешность оценки состояния пара будет минимальной и равна 6,5%.

б) Гиперболическое уравнение связи.

Гиперболическое уравнение связывает расходимый ресурс  $R$  с погрешностями измерения  $\delta_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) выражением вида

$$\frac{\beta_1}{\delta_1} + \dots + \frac{\beta_m}{\delta_m} = R \quad (6.17)$$

Составим функцию Лагранжа для функционала (3.23) и уравнения связи (6.17)

$$F = \sum_{i=1}^m \delta_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m G_{ij} r_{ij} \delta_i \delta_k + \lambda \left( \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\delta_i} - R \right) \quad (6.18)$$

После дифференцирования функции (6.18) по каждой переменной  $\delta_1, \dots, \delta_1, \dots, \delta_m$  и приравнивания их к нулю получим систему, состоящую из  $m$  однородных уравнений

$$\begin{aligned} 2G_{11}\delta_1 + 2G_{12}r_{12}\delta_1 + \dots + 2G_{1m}r_{1m}\delta_1 + \beta_1 \frac{\lambda}{\delta_1} &= 0 \\ 2G_{21}r_{21}\delta_2 + 2G_{22}\delta_2 + \dots + 2G_{2m}r_{2m}\delta_2 + \beta_2 \frac{\lambda}{\delta_2} &= 0 \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \\ 2G_{m1}r_{m1}\delta_m + 2G_{m2}r_{m2}\delta_2 + \dots + 2G_{mm}\delta_m + \beta_m \frac{\lambda}{\delta_m} &= 0 \end{aligned} \quad (6.19)$$

Число неизвестных в уравнениях (6.19) на единицу больше, числа уравнений. Использование уравнения связи (6.17) выравняет число уравнений и число неизвестных, и поэтому, как и в предыдущем случае, совместное решение этих уравнений принципиально существует. Однако присутствие в этих уравнениях нелинейных слагаемых затрудняет получение аналитических формул для расчета оптимальных значений погрешностей измерения в общем виде. Решение системы в этом случае возможно численным методом.

Для численного решения систему уравнений (6.19) преобразуем к удобному виду. Решая каждое из уравнений относительно переменных  $\delta_1, \dots, \delta_1, \dots, \delta_m$ , получим

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{\lambda}{\beta_1} \left( \frac{1}{G_{11}\delta_1 + G_{12}r_{12}\delta_2 + \dots + G_{1m}r_{1m}\delta_m} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \delta_2 &= \frac{\lambda}{\beta_2} \left( \frac{1}{G_{21}r_{21}\delta_1 + G_{22}\delta_2 + \dots + G_{2m}r_{2m}\delta_m} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (6.20)$$

$$\delta_m = \frac{\lambda}{\beta_m} \left( \frac{1}{G_{m1}r_{m1}\delta_1 + G_{m2}r_{m2}\delta_2 + \dots + G_{mm}\delta_m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Задаваясь произвольными значениями погрешностей  $\delta_i^{[1]}$  на первом шаге с помощью выражений (6.20) можно определить новые значения погрешностей с точностью до постоянного множителя  $\lambda$ . Значение постоянного множителя определяется из уравнения связи (6.17). На следующем шаге процедуру повторяют и находят новые значения погрешностей. Итерации заканчиваются при достижении заданного значения разности  $\Delta_3$

$$\delta_i^j - \delta_i^{j-1} \leq \Delta_3$$

Рассмотрим частный случай, когда отсутствует статистическая связь между погрешностями измерения, т.е. при  $r_{ij} = 0$  для всех  $i, j = 1, \dots, m$ .

Система уравнений (6.19) принимает вид

$$\begin{aligned} 2G_{11}\delta_1 + \beta_1 \frac{\lambda}{\delta_1^2} &= 0 \\ 2G_{22}\delta_2 + \beta_2 \frac{\lambda}{\delta_2^2} &= 0 \end{aligned} \tag{6.21}$$

$$2G_{mm}\delta_m + \beta_m \frac{\lambda}{\delta_m^2} = 0$$



Отсюда легко найти решения уравнений с точностью до постоянного множителя  $\lambda$

$$\delta_i^0 = \lambda \sqrt[3]{\frac{\beta_i}{G_{ii}}} \quad (6.22)$$

Значение постоянного множителя находится из уравнения связи (6.17). Подставляя в уравнение вместо погрешностей их значения в соответствии с формулами (6.22) находим

$$\lambda = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\beta_i^2 G_{ii}} \quad (6.23)$$

Если для непосредственного измерения при оценке состояния объекта измерения используются только два параметра, то обоснование точности их измерения можно произвести, пользуясь выражениями

$$\begin{aligned} \delta_1^0 &= \sqrt[3]{\frac{\beta_1}{G_{11}}} \cdot \left( \frac{1}{R} \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\beta_i^2 G_{ii}} \right), \\ \delta_2^0 &= \sqrt[3]{\frac{\beta_2}{G_{22}}} \cdot \left( \frac{1}{R} \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\beta_i^2 G_{ii}} \right) \end{aligned} \quad (6.24)$$

Из выражений (6.24) следует, что при выборе погрешностей целесообразно использовать следующие рекомендации. При ограниченных ресурсах наибольшую точность оценки состояния можно получить в том случае, если приборы с большими затратами ресурса брать с небольшим классом точности. В частности приборы с высокой стоимостью изготовления следует брать с небольшим классом точности. Влияние метрических свойств объекта измерения остается таким же, как и в предыдущем случае. Требования к точности измерения параметра  $x_i$  должны быть тем выше, чем больше компонент метрического тензора.

*Пример. Произвести выбор оптимальной погрешности измерения при измерении силы тока и напряжения в цепи по-*

стоянного тока. Состояние электрической цепи характеризуют четыре параметра: сила тока, напряжение, электрическое сопротивление и потребляемая мощность. Из таблицы 5.4 следует, что коэффициенты  $\beta_I, \beta_U$  для приборов, измеряющих эти величины, отличаются незначительно друг от друга. Компоненты метрического тензора для них равны между собой (см. п.6.3). Следовательно, как следует из формулы (6.24), для того, чтобы средства, отведенные для приобретения приборов, не превышали значения отведенного ресурса  $R$ , приборы для измерения этих физических величин должны иметь одинаковый класс точности. При этом оценка состояния электрической цепи будет определена с минимальной погрешностью. Конкретное значение класса точности зависит от цен, установленных на приборы и отводимого на их приобретение ресурса  $R$ .

### **6.2.2. Обеспечение минимальной погрешности косвенного измерения.**

Косвенные измерения применяются в том случае, когда невозможно непосредственное измерение контролируемой величины, например, для оценки обобщенных показателей, которые обладают значительной полезной информацией, как для управления, так и для технического обслуживания энергетического оборудования. Вполне естественным является стремление измерять их с максимально возможной точностью. Другими словами погрешность измерения обобщенных показателей должна быть минимальной. При ограниченных ресурсах подобное требование достигается методами оптимизации.

В соответствии с математической постановкой задача минимизации погрешности косвенного измерения обобщенного показателя  $y$  относится к прямой задаче. Для оптимизации в качестве функционала возьмем выражение для определения абсолютной погрешности косвенного измерения (3.15)

$$\Delta y^2 = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \Delta x_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial y}{\partial x_k} \right) \cdot r_{ik} \Delta x_i \cdot \Delta x_k$$

Коэффициентами при переменных, которыми являются погрешности непосредственного измерения  $\Delta x_i$  параметров  $x_i$ , являются частные производные, которые часто называют коэффициентами влияния. Обозначим их

$$k_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (6.25)$$

и запишем выражение (3.15) в новом виде

$$\Delta y^2 = \sum_{i=1}^m k_i^2 \Delta x_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m k_i k_j r_{ij} \Delta x_i \Delta x_j \quad (6.26)$$

Сопоставляя выражения (6.26) и (3.24), можно заметить, что они идентичны по форме, т.к.

$$k_i^2 \rightarrow G_{ii} \quad (6.27)$$

$$k_i k_j \rightarrow G_{ij}. \quad (6.28)$$

Следовательно, полученные в п. 6.2.1 выражения для оценки погрешностей измерения, можно применить и в данном случае, произведя соответствующие замены.

Рассмотрим способы обеспечения минимальной погрешности косвенного измерения при ограничениях, отражаемых линейными и гиперболическими уравнениями связи.

а). Линейное уравнение связи.

Для решения задачи функционал, выражающий оценку погрешности косвенного измерения, и линейное уравнение связи (6.5), характеризующего предпочтение одного параметра перед другим при распределении ресурсов, должны быть записаны с одинаковыми переменными. Пусть это будут абсолютные погрешности измерения параметров. Результатом решения

оптимизационной задачи являются следующие выражения для расчета рекомендуемых абсолютных погрешностей непосредственного измерения.

1. Общий случай: функционал имеет развернутый вид (6.26).

Абсолютные погрешности измерения параметров непосредственного измерения для оценки показателя с максимальной точностью без превышения ресурса равны:

$$\begin{aligned} \Delta x_1^0 &= R \frac{A_{11}}{\sum_{i=1}^m a_i A_{1i}} & \Delta x_i^0 &= R \frac{A_{1i}}{\sum_{i=1}^m a_i A_{1i}} \\ \Delta x_m^0 &= R \frac{A_{1m}}{\sum_{i=1}^m a_i A_{1i}} \end{aligned} \quad (6.29)$$

где  $A_{1i}$  - алгебраическое дополнение, в выражении (6.10) для которого необходимо произвести замену в соответствии с выражениями (6.27) и (6.28).

2. При отсутствии статистической связи между погрешностями измерения.

Абсолютные погрешности измерения параметров равны:

$$\Delta x_i^0 = R \frac{\frac{a_i}{k_i^2}}{\sum_{i=1}^m \frac{a_i^2}{k_i^2}} \quad (6.30)$$

3. При оценке обобщенного показателя по двум непосредственно измеряемым величинам погрешности равны:

при  $r_{12} \neq 0$ :

$$\Delta x_1^0 = R \frac{k_i k_j r_{12} a_2 - k_j^2 a_1}{2k_i k_j r_{12} a_1 a_2 - k_j^2 a_1^2 - k_i^2 a_2^2}, \quad (6.31)$$

$$\Delta x_2^0 = R \frac{k_i k_j r_{12} a_1 - k_i^2 a_2}{2k_i k_j r_{12} a_1 a_2 - k_j^2 a_1^2 - k_i^2 a_2^2}, \quad (6.32)$$

при  $r_{12} = 0$ :

$$\Delta x_1^0 = R \frac{k_j^2 a_1}{k_j^2 a_1^2 - k_i^2 a_2^2}, \quad \Delta x_2^0 = R \frac{k_i^2 a_2}{k_j^2 a_1^2 - k_i^2 a_2^2} \quad (6.33)$$

б) Гиперболическое уравнение связи.

Для функционала, выражающего оценку погрешности косвенного измерения, и гиперболического уравнения связи (6.17), характеризующего распределение затрат на создание приборов при ограниченном ресурсе, результатом решения оптимизационной задачи являются следующие выражения для расчета рекомендуемых погрешностей измерения.

1. При отсутствии статистической связи между погрешностями измерения.

Абсолютные погрешности измерения равны:

$$\Delta x_i^0 = \lambda \sqrt[3]{\frac{\beta_i}{k_i^2}} \quad (6.34)$$

2. При оценке обобщенного показателя по двум непосредственно измеряемым величинам.

Абсолютные погрешности измерения равны:

$$\Delta x_1^0 = \sqrt[3]{\frac{\beta_1}{k_1^2}} \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{\beta_1 k_1^2} + \sqrt[3]{\beta_2 k_2^2}}{R} \right),$$

$$\Delta x_2^0 = \sqrt[3]{\frac{\beta_2}{k_2^2}} \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{\beta_1 k_1^2} + \sqrt[3]{\beta_2 k_2^2}}{R} \right)$$

Физический смысл представленных выражений здесь такой же, как и для выражений, обеспечивающих минимальную суммарную погрешность оценки состояния. Отличие заключается в том, что метрические свойства объекта измерения в данном случае отражаются не компонентами метрического тензора  $g_{ij}$ , а коэффициентами влияния  $k_i$ .

### 6.2.3 Обеспечение минимальной стоимости измерений.

Задача обеспечения минимальной стоимости измерений в соответствии с предложенной классификацией относится к разряду обратных задач. Здесь в качестве функционала выступает выражение, связывающее стоимость приборов с их точностью. В прямой задаче это выражение использовалось как уравнение связи. И наоборот, ограничением является заданная погрешность измерения.

Стоимость информационно-измерительной системы в зависимости от точности используемых в ней приборов определяется выражением

$$C = C_0 + \frac{\beta_1}{\delta_1} + \dots + \frac{\beta_i}{\delta_i} \quad (6.35)$$

где  $\delta_i$  – нормируемая (относительная или приведенная) погрешность прибора, входящего в систему;

$\beta_i$  – коэффициент, отражающий затраты на изготовление прибора;

$C_0$  – затраты на создание системы, несвязанные с точностью измерения.

В качестве уравнений связи используем линейное и квадратичное уравнения. Первое уравнение характеризует ограничения, связанные с приоритетом одного прибора перед другим по важности измеряемых ими параметров. Второе уравнение характеризует ограничения, связанные с заданными погрешностями измерения параметров. Заметим, что перемен-

ные в уравнениях связи должны быть выражены в той же форме, в которой они представлены в функционале (6.35).

а). Линейное уравнение связи.

Для решения оптимизационной задачи воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. Составим функцию Лагранжа

$$F = \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\delta_i} + C_0 + \lambda (\sum a_i \delta_i - R)$$

После дифференцирования по каждой переменной функции Лагранжа и приравнивания производных к нулю получим систему уравнений, состоящую из  $m$  уравнений с  $m+1$  неизвестными.

$$\begin{aligned} \frac{\beta_1}{\delta_1^2} + \lambda a_1 &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\beta_i}{\delta_i^2} + \lambda a_i &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\beta_m}{\delta_m^2} + \lambda a_m &= 0 \end{aligned} \quad (6.36)$$

Учитывая, что погрешность измерения никогда не может быть равна нулю ( $\delta \neq 0$ ), легко видеть, что решением системы уравнений с точностью до постоянного множителя является

$$\delta_1^0 = \sqrt{\frac{\beta_1}{\lambda a_1}}, \dots, \delta_i^0 = \sqrt{\frac{\beta_i}{\lambda a_i}}, \dots, \delta_m^0 = \sqrt{\frac{\beta_m}{\lambda a_m}} \quad (6.37)$$

Неопределенный множитель  $\lambda$  находится из уравнения связи. Подставляя в него вместо неизвестных полученные решения (6.37), можно найти его численное значение по формуле

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m a_i}{\sum_{i=1}^m \beta_i}} \quad (6.38)$$

Из полученного решения следует, что для достижения минимальной стоимости информационно-измерительной системы приборы с низким классом точности следует использовать в том случае, если требуются большие затраты на повышение их точности. Но чем важнее измеряемый параметр и соответственно больше весовой коэффициент  $a_i$ , тем более точный прибор должен использоваться. Этот результат согласуется со здравым смыслом, и тем более важно, что он получен формальными методами, позволяющими расчетным путем обосновать точность измерений.

б) Квадратичное уравнение связи.

Потребность в обеспечении минимальной стоимости информационно-измерительной системы должна быть достигнута либо при заданной погрешности измерения отдельных параметров, либо показателей косвенного измерения, либо при заданной погрешности оценки состояния. В последних двух случаях для поиска оптимального решения следует использовать квадратичное уравнение связи.

$$k_1^2 \delta_1^2 + \dots + k_i^2 \delta_i^2 + \dots + k_m^2 \delta_m^2 = R \quad (6.39)$$

где  $k_i$  - коэффициент влияния (см. 6.25 и 6.27),  
**R** - заданное значение ресурса.

Для решения оптимизационной задачи составим функцию Лагранжа для функционала (6.34) и уравнения связи (6.39).

$$F = \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\delta_i} + C_0 + \lambda \left( \sum_{i=1}^m k_i^2 \delta_i^2 - R \right) \quad (6.40)$$



Взяв производную от этой функции по каждой переменной  $\delta_i$  и приравняв их нулю, получим уравнения вида

$$\frac{\beta_i}{\delta_i^2} + 2\lambda k_i^2 \delta_i = 0 \quad (6.41)$$

Учитывая, что  $\delta_i \neq 0$  каждое из этих уравнений можно решить относительно неизвестной с точностью до постоянного множителя.

$$\delta_i^0 = 3 \sqrt{\frac{\beta_i}{2\lambda k_i^2}} \quad (6.42)$$

Значение постоянного множителя находится с помощью уравнения связи (6.39). Подставляя в него вместо погрешностей их значения в соответствии с формулой (6.42), получим  $\lambda$ . Здесь выражение для расчета  $\lambda$  не приводится из-за его громоздкости.

Из полученного решения следует такой же по смыслу вывод, как и при линейном уравнении связи. Для достижения минимальной стоимости информационно-измерительной системы приборы с большими затратами на повышение их точности следует использовать с низким классом точности, но чем важнее измеряемый параметр, тем больше коэффициент влияния  $k_i$ , тем точнее должен быть прибор.

#### **6.2.4. Оптимальное соотношение погрешностей измерения параметров.**

Рассмотренные выше методы расчета погрешностей измерения позволяют обосновать их назначение во время проектирования энергетического оборудования. Некоторое затруднение может вызвать необходимость определения заданного ресурса  $R$  в уравнениях связи. Оно обусловлено тем, что точность измерения ограничивается множеством факторов, часть которых с трудом поддается численной оценке, например, жи-

вучесть систем контроля, надежность средств измерения, ценность измерения и т.д.

В то же время в ряде случаев точность измерения отдельных параметров энергетической установки может быть известна заранее, в частности, при необходимости измерения этого параметра с максимально достижимой точностью. Этот параметр следует принять в качестве базового параметра. В этих условиях нет необходимости в задании значения ресурса, достаточно определить, в каких соотношениях по точности измерения находятся остальные физические величины по сравнению с базовым параметром. Другими словами, необходимо определить оптимальное соотношение относительных погрешностей измерения.

$$\delta_1^0 : \dots : \delta_i^0 : \dots : \delta_m^0$$

Оптимальное соотношение показывает, во сколько раз необходимо один параметр измерять точнее другого для того, чтобы целевая функция имела минимальное значение при ограниченном ресурсе. Для любых двух параметров  $x_i$  и  $x_k$  прямого измерения оптимальное соотношение равно

$$p_{ik} = \frac{\delta_i^0}{\delta_k^0} \quad (6.43)$$

Подставляя в выражение (6.43) формулы для расчета оптимальных значений погрешностей, найденные выше для соответствующих случаев, получим искомые соотношения погрешностей. Достоинством этих соотношений является отсутствие в них ресурса  $R$ . В таблице 6.1 приведены формулы для расчета оптимального соотношения погрешностей для всех ранее рассмотренных вариантов. В целях наглядности представления формулы приведены для статистически независимых погрешностей измерения параметров  $r_{ij} = 0$ .

Таблица 6.1

Вид уравнения связи	Цель оптимизации		
	Минимизация погрешности оценки состояния	Минимизация погрешности косвенного измерения	Минимизация стоимости измерений
Линейное	$\frac{\delta_i^0}{\delta_k^0} = \frac{a_i}{a_k} \cdot \frac{G_{kk}}{G_{ii}}$	$\frac{\delta_i^0}{\delta_k^0} = \frac{a_i}{a_k} \cdot \frac{k_k^2}{k_i^2}$	$\frac{\delta_i^0}{\delta_k^0} = \sqrt{\frac{\beta_i}{\beta_k} \cdot \frac{a_k}{a_i}}$
Гиперболическое	$\frac{\delta_i^0}{\delta_k^0} = \sqrt[3]{\frac{\beta_i}{\beta_k} \cdot \frac{G_{kk}}{G_{ii}}}$	$\frac{\delta_i^0}{\delta_k^0} = \sqrt[3]{\frac{\beta_i}{\beta_k} \cdot \frac{k_k^2}{k_i^2}}$	–
Квадратичное	–	–	$\frac{\delta_i^0}{\delta_k^0} = \sqrt[3]{\frac{\beta_i}{\beta_k} \cdot \frac{k_k^2}{k_i^2}}$

При непосредственном измерении двух физических величин оптимальное отношение показывает, во сколько раз требования к точности измерения одного параметра должны быть выше, чем для другого параметра, чтобы достигнуть цели оптимизации. Из приведенных соотношений следует, что при отсутствии каких-либо причин по предпочтению точности измерения одного параметра перед другим ( $a_1 = a_2$  или  $\beta_1 = \beta_2$ ), оптимальное отношение погрешностей зависит только от метрических свойств объекта измерения. В данном случае метрические свойства проявляются через компоненты метрического тензора  $G_{ii}$  или через коэффициенты влияния  $k_i$ .

Следует обратить внимание на то, что во все соотношения входят частные производные. Следовательно, если математическая модель объекта измерения не линейная, то каждому состоянию объекта отвечает свое оптимальное соотношение погрешностей. В этом случае при изменении состояния изменятся и оптимальное соотношение. Поэтому для обоснования точности измерения параметров нелинейных объектов следует

провести анализ изменения оптимального соотношения в зависимости от значений их параметров. Для анализа необходимо выделить один или несколько базовых параметров и проанализировать степень изменения оптимального соотношения в зависимости от изменения их значений. В результате анализа должны быть выработаны рекомендации по обоснованию точности измерения параметров. Если в результате анализа выясняется, что оптимальное соотношение изменяется значительно, то возможны следующие варианты обоснования точности измерения: использование приборов с различными диапазонами измерения, назначение точности исходя из среднего для оптимальных значений.

*Пример. Найдем оптимальное соотношение точности измерения параметров для гидравлической части центробежного насоса ЭЦН 2700/8,5. Известно, что для этого объекта контроля основными параметрами являются частота вращения, давление в напорном патрубке, давление во всасывающей трубке. Кроме этого состояние насоса характеризуется подачей, потребляемой мощностью и гидравлическим коэффициентом полезного действия.*

*Из приведенного анализа объекта контроля следует, что параметрами непосредственного измерения являются первые три, а остальные необходимо оценивать косвенным путем. Для подобного объекта измерения метрический тензор имеет вид*

$$G = \begin{vmatrix} G_{11} & G_{21} & G_{31} \\ G_{12} & G_{22} & G_{32} \\ G_{13} & G_{23} & G_{33} \end{vmatrix}$$

*Для нахождения тензора, порядок которого больше двух, и его наглядного представления удобно воспользоваться так называемой матрицей влияния. Для производных, используемых в относительном виде, она имеет вид*

$$C = \begin{vmatrix} \frac{\partial Q}{\partial p} \text{ p} & \frac{\partial N}{\partial p} \text{ p} & \frac{\partial \eta}{\partial p} \text{ p} \\ \frac{\partial Q}{\partial p} \text{ Q} & \frac{\partial N}{\partial p} \text{ Q} & \frac{\partial \eta}{\partial p} \text{ Q} \\ \frac{\partial Q}{\partial n} \text{ p} & \frac{\partial N}{\partial n} \text{ p} & \frac{\partial \eta}{\partial n} \text{ p} \\ \frac{\partial Q}{\partial n} \text{ Q} & \frac{\partial N}{\partial n} \text{ Q} & \frac{\partial \eta}{\partial n} \text{ Q} \end{vmatrix}$$

С помощью матрицы влияния легко находятся компоненты метрического тензора по формулам (2.30) (2.31). По данным формуляров, а при необходимости и с помощью специальных испытаний, из характеристик насоса ЭЦН 2700/8,5 находятся численные значения компонент. Они равны

$$G = \begin{vmatrix} 2,31 & -1,50 & 3,81 \\ -1,50 & 2,18 & -3,06 \\ 3,81 & -3,06 & 11,86 \end{vmatrix}$$

Отличие диагональных элементов от единицы, а недиагональных элементов от нуля говорит о сложной структуре пространства наблюдения, которую необходимо учитывать при организации контроля функционирования и технического состояния насосов. Сравнивая численные значения компонент, можно заметить, что диагональный элемент, соответствующий частоте насоса, значительно превосходит остальные. Это означает, что частоту вращения рассматриваемого насоса необходимо измерять более точно, чем остальные параметры. Примем класс точности тахометра равным 2.5 в соответствии с практикой эксплуатации. В этом случае в соответствии с соотношениями, приведенными в табл. 6.1, требования к точности измерения двух других параметров в пять раз ниже. Поэтому обслуживающему персоналу для контроля функционирования насоса достаточно использовать сигнализацию о давлении в напорном и во всасывающем патрубках. Подобное решение удешевит систему контроля и уменьшит количество поверяемых приборов.

### 6.3. Выбор оптимальной совокупности контролируемых параметров.

#### 6.3.1. Использование метрологических показателей для оптимизации.

Оценка состояния объекта измерения может осуществляться измерением той или иной совокупности параметров, частично или даже полностью отличающихся между собой, если все они удовлетворяют требованиям по полноте контроля и другим метрологическим показателям. В этом случае необходимо произвести выбор одного наиболее предпочтительного варианта.

Существование различных вариантов групп контролируемых параметров возможно в том случае, когда параметры связаны между собой аналитическими зависимостями (см. п. 2.3). Исследование взаимной зависимости параметров показывает, что в состав параметров, характеризующих состояние объекта измерения, могут входить выходные показатели, внутренние параметры и внешние воздействия во всем их разнообразии. При известной зависимости между ними можно непосредственно измерять часть из них и оценивать значения остальных параметров косвенным путем. Для оценки качества функционирования или технического состояния они рассчитываются с помощью уравнений вида (2.26), связывающих их с параметрами непосредственного измерения.

Минимальное количество параметров непосредственного измерения  $m$ , которые должны быть выбраны и измерены, определяется разностью общего количества переменных  $n$  в уравнениях (2.26) и числа этих уравнений  $h$ .

$$m = n - h$$

Очевидно, что выбор возможен только в том случае, когда количество  $k$  параметров, для которых технически осуществимо непосредственное измерение, больше минимально необходимого количества  $m$ . Максимальное количество  $l$  таких групп получается в том случае, когда непосредственно можно измерить любой параметр состояния. Оно определяется числом сочетаний

$$l = \frac{k!}{m!(k-m)!}$$

При  $l \geq 2$  среди всех возможных групп параметров можно выбрать наилучшую с некоторой точки зрения группу.

В зависимости от задач, решаемых информационно-измерительной системой, для выбора наилучшей группы необходимо использовать какой-то определенный метрологический показатель (см. п. 5.3). Для выделяемой совокупности параметров он должен иметь максимальное или минимальное значение в зависимости от решаемых задач. Если главным при контроле является оценка состояния объекта измерения в целом, то наиболее подходящим метрологическим показателем является суммарная погрешность измерения состояния (3.33). Ввиду того, что выбираемая группа содержит минимальное количество параметров, а критерий выбора имеет максимальное или минимальное значение, то можно утверждать, что производится выбор оптимальной совокупности контролируемых параметров.

### **6.3.2. Использование метрических свойств объекта измерения для оптимизации.**

Анализ параметрического описания объекта измерения позволил установить, что он обладает определенными метрическими свойствами (см. п. 2.3.). При независимости физических величин объекта измерения его метрические свойства указывают на равнозначность параметров. При наличии взаимосвязи между физическими величинами равнозначность ут-

рачивается, и выделяются те параметры, которые вносят наибольший вклад в точность оценки состояния объекта измерения.

Кроме этого, взаимосвязь физических величин обеспечивает возможность выделения различных совокупностей параметров, с помощью которых можно оценить состояние объекта измерения. Как показано выше, при комбинировании непосредственно измеряемых величин максимально можно получить  $l$  таких групп. Каждая группа параметров представляет собой систему координат, являющуюся базисом пространства наблюдения. Все полученные при таком переборе системы координат являются равноправными с точки зрения аффинных преобразований, т.е. таких преобразований пространства состояния, при которых не учитывается метрика пространства.

Реально существующее физическое явление, отражаемое уравнениями состояния (2.26), не зависит от того, в какой системе координат это явление рассматривается. В любой системе координат его можно физически истолковать. Но метрики пространств наблюдения с различными базисами будут отличаться, т.к. они являются римановыми пространствами (см. п. 2.3). Следовательно, с точки зрения измерения, где большое значение имеет именно метрика пространства, различные системы координат неравноправны.

Влияние базиса на метрику пространства наблюдения можно показать путем оценки изменения длины вектора при переходе от одной системы координат к другой.

Длина вектора в пространстве определяется квадратичной формой относительно координат  $x_1, \dots, x_i, \dots, x_m$  [57].

$$|x|^2 = \sum_{ik=1}^m s_{ik} x_i x_k,$$

где  $s_{ik}$  - скалярное произведение базисных векторов,  $s_{ik} = (e_i, e_k)$ . При равенстве единичных векторов (пусть  $|e_i| = |e_k| = 1$ ) имеем  $s_{ik} = \cos(\tilde{e}_i, \tilde{e}_k)$ . Для независимых век-



торов  $s_{ii} = 1$ ,  $s_{ik} = 0 (i \neq k)$  и длина вектора определяется известным выражением

$$|x|^2 = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_m^2$$

При переходе к новому базису  $z_1, \dots, z_i, \dots, z_m$  вектор равен

$$x = a_1 z_1 + a_2 z_2 + \dots + a_m z_m.$$

Выражение для квадрата длины вектора  $x$  в новой системе координат равно

$$|x|^2 = \sum_{ik=1}^m c_{ik} \cdot a_i z_i \cdot a_k z_k,$$

где коэффициенты  $c_{ik}$  определяются по формуле скалярного произведения векторов  $z_i, z_k$ . В зависимости от коэффициентов  $a_i, a_k$  в формуле для переходов от одного базиса к другому длина вектора  $x$  в новом базисе может либо увеличиваться, либо уменьшаться. Естественно предположить, что лучшей с точки зрения наблюдения будет та система координат, в которой длина вектора больше.

Снова рассмотрим  $m$  – мерное многообразие, выражаемое уравнениями (2.26), в  $n$  – мерном пространстве состояния  $P$  (см. п.2.3). Вычислим дифференциалы дуги по кривой на многообразии в координатах  $x_1, \dots, x_m$  и в координатах  $z_1, \dots, z_i, \dots, z_m$  пространства наблюдения  $X$ . Они равны

$$dS^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_{ij}(x_1, \dots, x_m) dx_i dx_j \quad (6.44)$$

$$dS^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \hat{G}_{ij}(z_1, \dots, z_m) dz_i dz_j \quad (6.45)$$

Метрические формы (6.44) и (6.45) равны между собой. Здесь уравнивание происходит за счет совместного влияния

компонент метрического тензора  $G_{ij}$  и дифференциалов. Предположим, что в обоих пространствах наблюдения производится одинаковое приращение координат, т.е. равны между собой соответствующие дифференциалы  $dx_i = dz_i$ . Тогда метрические формы (6.44) и (6.45) становятся неравными. Их значения определяются компонентами метрического тензора в соответствующей системе координат.

Минимально-различимое расстояние между двумя бесконечно близкими точками характеризует разрешающую способность при наблюдении. Чем меньше это расстояние, тем большее число состояний можно различать. Следовательно, чем меньше метрическая форма, тем больше разрешающая способность системы координат относительно наблюдаемых физических явлений, определяемых уравнениями (2.26). Это обстоятельство используется для оценки эффективности систем географических координат [58, 59].

В свою очередь численное значение минимально различимого расстояния зависит от метрического тензора, компоненты которого определяют метрику риманова пространства (см. п.2.3). Напомним, что метрический тензор представляет собой квадратную матрицу порядка  $m$ , который равен размерности пространства наблюдения (формула 2.28).

$$G = \begin{vmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1m} \\ & G_{22} & \dots & G_{2m} \\ & & \dots & \dots \\ & & & G_{mm} \end{vmatrix}$$

Выбор системы координат с максимальной разрешающей способностью с помощью дифференциальной квадратичной формы заключается в сравнении соответствующих значений компонент метрического тензора  $G_{ik}$  для анализируемой системы координат в различных системах координат. Ясно, что чем меньше значения  $G_{ik}$ , тем меньше значения квадратичной формы, тем выше разрешающая способность системы координат.

Сложность заключается в том, что сравнение двух квадратичных форм возможно только в том случае, если все значения коэффициентов  $G_{ik}$  одной формы будут меньше соответствующих коэффициентов другой формы. Однако на практике это встречается очень редко. Поэтому производят преобразование квадратичных форм к каноническому виду. Так делают в технической диагностике, в психологии и в других областях науки, когда используют метод главных компонент [29]. В соответствии с основной теоремой о квадратичных формах [19] матрица (2.28) некоторым ортогональным преобразованием  $Q$  может быть приведена к каноническому виду  $G_I$

$$G_I = Q'GQ = \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ & \lambda_2 & \dots & 0 \\ & & \dots & \dots \\ & & & \lambda_m \end{vmatrix} \quad (6.46)$$

Диагональные элементы матрицы  $G_I$  являются характеристическими корнями матрицы  $G$ , т.е. собственными значениями квадратичной формы. Преобразование  $Q$  приводит дифференциальную квадратичную форму (6.44) к виду суммы квадратов новых переменных  $dx'_i$  с коэффициентами, соответствующими собственным значениям

$$dS^2 = \lambda_1(dx'_1)^2 + \lambda_2(dx'_2)^2 + \dots + \lambda_m(dx'_m)^2 \quad (6.47)$$

Новые переменные  $dx'_i$  квадратичной формы (6.47) связаны со старыми переменными  $dx_i$  квадратичной формы (6.44) матричным выражением

$$dx'_i = Q dx_i \quad (6.48)$$

В методе главных компонент производят сравнение уже не компонент метрического тензора  $G_{ik}$ , а собственных значений матрицы  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ . В ряде случаев сопоставление собственных значений позволяет сделать выводы о более эффек-

тивной системе координат. Большой разрешающей способностью обладает та система координат, для которой выполняется одно из следующих условий:

1. Максимальное собственное значение  $\lambda_{\max}$  одной формы меньше минимального собственного значения  $\lambda_{\min}$  другой формы.

2. Собственные значения одной формы меньше соответствующих собственных значений другой формы.

Подчеркнем, что все рассуждения о разрешающей способности и выборе системы справедливы лишь в окрестности точки  $M$ . Для линейного объекта измерения, у которого производные и соответственно компоненты метрического тензора имеют постоянные значения, они справедливы во всем пространстве наблюдения. Для нелинейного объекта разрешающая способность неоднозначна в различных точках пространства наблюдения. Для того чтобы сделать заключение об эффективности системы координат для той или иной части пространства наблюдения, необходимо произвести аналогичные рассуждения для каждой точки этой области.

Выбор эффективной системы координат по собственным значениям метрической формы ограничен по области применения, т.к. в большинстве практических случаев собственные значения квадратичных форм не удовлетворяют перечисленным выше условиям, и это обстоятельство не позволяет сделать необходимое заключение. Тем не менее, рассмотренный метод представляет большой интерес. Он указывает, что принципиально существует возможность выбора оптимальной системы координат на основе анализа разрешающей способности. В этой системе координат физические процессы можно рассматривать наиболее точно.

Для наглядности рассмотрим физические явления в трехмерном пространстве состояния, описываемые уравнениями вида (2.25).

$$f(p_1, p_2, p_3) = 0$$

Все состояния объекта измерения в координатах  $(p_1, p_2, p_3)$  отражаются точками, лежащими на поверхности (2.25). Для оценки состояния достаточно измерения двух физических величин, третья физическая величина рассчитывается с помощью выражения (2.25). Пространство наблюдения представляет собой двухмерное пространство  $X$ . Пусть для определенности, величинами прямого измерения являются  $x_1 = p_1$ ,  $x_2 = p_2$ . Косвенным путем определяется величина  $y = p_3$ . Тогда

$$y = \varphi(x_1, x_2).$$

Выражение для метрической формы имеет вид

$$ds^2 = G_{11}dx_1^2 + 2G_{12}dx_1dx_2 + G_{22}dx_2^2 \quad (6.49)$$

Компоненты метрического тензора в соответствии с формулами (2.30) и (2.31) равны

$$G_{11} = 1 + a^2, \quad G_{22} = 1 + b^2, \quad G_{12} = ab \quad (6.50)$$

$$\text{где: } a = \frac{\partial y}{\partial x_1}, \quad b = \frac{\partial y}{\partial x_2}.$$

В том случае, если можно непосредственно измерить величину  $p_3$ , то можно выбрать другую систему координат, для которой компоненты метрического тензора равны соответственно  $G'_{11}$ ,  $G'_{22}$ ,  $G'_{12}$ . Из выражения (6.49) следует, что оптимальной системой координат будет та, для которой значения компонент меньше. В том случае, если знаки неравенств различны (например,  $G_{11} < G'_{11}$ ,  $G_{22} > G'_{22}$ ) необходимо перейти к сравнению собственных значений  $\lambda_{1,2}$  квадратичной формы. Для двухмерного случая собственные значения находятся из выражения [60]

$$\lambda_{1,2} = \frac{G_{11} + G_{22} \pm \sqrt{(G_{11} + G_{22})^2 - 4(G_{11}G_{22} - G_{12}^2)}}{2} \quad (6.51)$$

Подставляя в формулу (6.51) выражения (6.50) получим компактные выражения

$$\lambda_1 = 1, \quad \lambda_2 = 1 + a^2 + b^2 \quad (6.52)$$

Из выражения (6.52) следует, что одно собственное значение метрической формы (6.49) всегда равно единице, второе значение определяется коэффициентами  $a$  и  $b$ . В соответствии с выражением (6.52) оно зависит от выбранной системы координат и от наблюдаемого физического явления. Таким образом, в данном случае можно производить сравнение систем координат только по одному собственному значению. Оптимальная система координат, очевидно, обладает минимальным собственным значением  $\lambda_2$ .

*Пример. Рассмотрим электрическую цепь постоянного тока. Физические процессы, происходящие на участке электрической цепи постоянного тока, характеризуются силой тока, напряжением, мощностью и сопротивлением, связанными между собой следующими выражениями*

$$N = IU, \quad U = IR \quad (6.53)$$

*Если измерения производятся для технологического контроля, то можно считать сопротивление электрической цепи постоянным. Измерения можно производить в трех системах координат:*

- напряжение – сила тока,*
- напряжение – мощность,*
- мощность – сила тока.*

*В таблице 6.2 приведены выражения для частных производных, компонент метрического тензора и собственных значений для каждой из анализируемых систем координат. С целью облегчения анализа формулы для частных производных выражены через сопротивления и мощность электрической цепи. Ввиду того, что анализируемые физические величины являются неоднородными, они имеют различные размерности. Поэтому все расчеты производятся в относительных единицах.*

Таблица 6.2

Наименование расчетных величин	Условное обозначение	Системы координат		
		<i>I-U</i>	<i>U-N</i>	<i>I-N</i>
Величина, изме- ряемая косвен- ным путем	<i>y</i>	<i>N</i>	<i>I</i>	<i>U</i>
Параметры непосредствен- ного измерения	<i>x</i> <sub>1</sub> <i>x</i> <sub>2</sub>	<i>I</i> <i>U</i>	<i>U</i> <i>N</i>	<i>I</i> <i>N</i>
Частные про- изводные	$\frac{\partial y}{\partial x_1}$	$2\sqrt{RN}$	$\frac{1}{R}$	<i>R</i>
	$\frac{\partial y}{\partial x_2}$	$2\sqrt{\frac{R}{N}}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{NR}}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{R}{N}}$
Частные про- изводные в без- размерной форме	$\frac{\partial y}{\partial x_1} \times \frac{x_1}{y}$	<b>2</b>	<b><i>I</i></b>	<b>0,5</b>
	$\frac{\partial y}{\partial x_2} \times \frac{x_2}{y}$	<b>2</b>	<b>0,5</b>	<b><i>I</i></b>
Компоненты метрического тензора	<b><i>G</i><sub>11</sub></b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
	<b><i>G</i><sub>22</sub></b>	<b>5</b>	<b>1,25</b>	<b>1,25</b>
	<b><i>G</i><sub>12</sub></b>	<b>4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
Собственное значение	<b><math>\lambda_2</math></b>	<b>9</b>	<b>2,25</b>	<b>2,25</b>

Анализ результатов расчета показывает, что из трех рассмотренных систем координат одна из них (напряжение – сила тока) имеет самое большое собственное значение  $\lambda_2$ . Следовательно, ее разрешающая способность меньше, чем у двух других систем координат. Более эффективно измерять мощность, потребляемую в электрической цепи, и напряжение или силу тока. Эти системы координат пространства наблюдения с точки зрения точности оценки состояния равноценны. При использовании этих рекомендаций суммарная погреш-

ность измерения всех трех параметров состояния будет минимальной при условии, что параметры пространства наблюдения всегда измеряются с одинаковой точностью.

### **6.3.3. Выбор совокупности параметров, обеспечивающей максимальную точность измерения.**

а). Критерий эффективности системы координат.

Точность является качественной характеристикой измерения. Количественной характеристикой является погрешность. Поэтому, если ставится задача нахождения систем координат или совокупности параметров, с помощью которых производятся наиболее точные измерения, логично в качестве критерия эффективности системы координат использовать суммарную погрешность измерения всех параметров состояния. Совокупность непосредственно измеряемых параметров будет оптимальной, если погрешность оценки состояния будет минимальна при соблюдении определенных ограничений.

При таком подходе критерий эффективности системы координат должен учитывать особенности прямых, косвенных, совокупных и совместных измерений, т.к. в каждом из указанных случаев суммарная погрешность рассчитывается по-разному.

При совокупных измерениях проводятся прямые измерения однородных величин. Если существует несколько вариантов оценки состояния, то для выбора наилучшего варианта можно воспользоваться критерием эффективности. Критерием является минимум суммы квадратов абсолютных или относительных погрешностей измеряемых величин.

$$L = \min \sum_{i=1}^m \Delta x_i^2 \quad (6.54)$$

$$L = \min \sum_{i=1}^m \delta x_i^2 \quad (6.55)$$



При косвенных измерениях проводятся прямые измерения неоднородных величин. Если измеряемый косвенным путем показатель можно определить несколькими способами, то для выбора лучшего способа также можно воспользоваться критерием эффективности. В нем погрешности прямого измерения складываются в соответствии с вкладом этих величин (см. п. 3.2, формулы 3.15 и 3.16).

$$L = \min \Delta y^2 = \min \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2 \quad (6.56)$$

$$L = \min \delta y^2 = \min \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y} \delta x_i \right)^2 \quad (6.57)$$

При совместных измерениях проводятся измерения физических величин, измеряемых как прямым, так и косвенным путем. Если существует несколько способов оценки состояния, то для выбора лучшего способа также можно воспользоваться критерием эффективности, который рассчитывается как сумма относительных погрешностей при прямом и косвенном измерениях

$$L = \min \left( \sum_{i=1}^m \delta x_i^2 + \sum_{j=1}^h \delta y_j^2 \right) \quad (6.58)$$

Для расчета суммарной погрешности прямых и косвенных измерений можно использовать выражение для погрешности оценки состояния (3.24). Тогда критерий эффективности имеет вид

$$L = \min \sigma^2 \quad \text{или} \quad L = \min \sum_{i=1}^m G_{ii} \sigma_i^2 \quad (6.59)$$

где  $\sigma$  - погрешность оценки состояния, которая находится по формуле (3.25).

При постановке оптимизационной задачи было показано, что оптимальная точность измерения зависит от того, в какой системе координат производятся измерения. Поэтому если в выражения (6.54 – 6.59) подставить найденные ранее оптимальные погрешности  $\sigma_i^0$ , то получим критерий для выбора оптимального способа измерения. Он гарантирует выбор оптимальной совокупности непосредственно измеряемых параметров и оптимальную точность их измерения, обеспечивающих максимальную точность оценки состояния объекта измерения или обобщенного показателя при наложенных ограничениях.

*Пример. Определить оптимальную систему координат для теплообменного аппарата, рассматриваемого в качестве примера в п.5.4.4.*

*В табл. 5.8 приведены результаты расчетов погрешности оценки состояния для шести возможных систем координат, в которых можно определить состояние теплообменного аппарата при его функционировании. Минимальная погрешность оценки состояния  $\sigma = 4$  имеет место при выборе следующих координат:*

- температура теплоносителя на входе в теплообменник,*
- температура нагреваемой среды на входе в теплообменник.*

б). Критерий выбора оптимального способа измерения.

Рассмотрим типовые случаи выбора оптимального способа измерения.

1. Выбор оптимального способа измерения с минимальной погрешностью оценки состояния при ограниченных ресурсах.

Суммарная погрешность измерения всех параметров состояния, оцениваемых как непосредственно, так и косвенным путем, имеет минимальное значение, если выполнены требования по точности непосредственного измерения в соответствии с постановкой прямой оптимизационной задачи (п. 6.2). Если такие требования выполнить для всех реально существующих

систем координат, то для каждой из них получим свой минимум погрешности оценки состояния (см. п. 6.2). Следовательно, число метрологических показателей (суммарная погрешность измерения всех параметров состояния) равно количеству сравниваемых систем координат. Оптимальным способом измерения является такой, при использовании которого показатель имеет наименьшее значение (см. выражение 6.4).

При определенных допущениях можно получить аналитические выражения для критерия выбора оптимального способа измерения при линейных и гиперболических уравнениях связи.

а) Линейное уравнение связи.

При наличии предпочтений одного параметра перед другим в виде линейного уравнения связи оптимальные погрешности измерения определяются выражениями (6.9). При выборе системы координат предположим, что погрешности их измерения не зависят друг от друга. В этом случае выражения (6.9.) упрощаются до вида (6.12). Подставляя значения погрешностей измерения из формулы (6.12) в выражение (6.58), получим критерий для выбора системы координат с максимальной разрешающей способностью при линейном уравнении связи

$$L = \min \frac{R^2}{\sum_{i=1}^m \frac{a_i^2}{G_{ii}}} \quad (6.60)$$

Отметим, что предположение о статистической независимости погрешностей измерения позволяет определить оптимальный способ измерения непосредственно по формуле (6.60) без предварительных расчетов оптимальных погрешностей измерения. Это позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на обоснование и выбор совокупности контролируемых параметров. Из формулы следует, что выбор способа измерения зависит от степени предпочтения одного параметра перед другим, определяемого коэффициентами  $a_i$ , от метрических свойств системы координат, отражаемых компонентами  $G_{ii}$  и

от заданного ресурса  $R$ . Следует обратить внимание, что  $G_{ii}$  зависит от значений измеряемых параметров, т.к. в формулы для расчета входят частные производные. Поэтому для нелинейных объектов измерения способ измерения может быть оптимальным только для определенной области изменения параметров. В другой области оптимальным может стать другой способ измерения.

б) Гиперболическое уравнение связи.

При ограниченных ресурсах, отражаемых гиперболическим уравнением связи, оптимальные погрешности измерения определяются выражением (6.24). Подставляя значения погрешностей в выражение (6.58), получим критерий для выбора системы координат с максимальной разрешающей способностью при гиперболическом уравнении связи.

$$L = \min \frac{1}{R^2} \left( \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\beta_i^2 G_{ii}} \right)^3 \quad (6.61)$$

Заменяя  $R$  значением того или иного ресурса, получим соответствующий критерий оптимальности. Например, при ограничениях на стоимость  $C$  информационно-измерительной системы критерий имеет вид

$$L = \min \frac{1}{C^2} \left( \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\beta_i^2 G_{ii}} \right)^3 \quad (6.62)$$

Выражения (6.61) и (6.62) также позволяют определить оптимальный способ измерения без предварительных вычислений оптимальных погрешностей измерения. Выбор определяется долей затрат  $\beta_i$  соответствующего ресурса, например, стоимости на каждый из приборов и метрическими свойствами  $G_{ii}$  объекта измерения.

2. Выбор оптимального способа измерения с минимальной погрешностью косвенного измерения.

При оценке обобщенных показателей косвенным путем также могут быть наложены ограничения на погрешности из-

мерения. В этом случае, как показано в п. 6.2, существует оптимальная погрешность измерения. Подставляя ее значение в выражения (6.56) получим критерий выбора оптимального способа косвенного измерения показателей.

а). Линейное уравнение связи.

При наличии предпочтений одного параметра перед другим в виде линейного уравнения связи оптимальные погрешности косвенного измерения определяются выражениями (6.30). После подстановки их в выражение (6.56) критерий выбора оптимального способа косвенного измерения примет вид

$$L = \min \frac{R^2}{\sum_{i=1}^m \left( \frac{a_i}{k_i} \right)^2} \quad (6.63)$$

Оптимальный способ косвенного измерения также можно определить непосредственно по формуле (6.63) без предварительных расчетов оптимальных погрешностей непосредственного измерения параметров. Из формулы следует, что выбор способа измерения зависит от степени предпочтения одного параметра перед другим, определяемого коэффициентами  $a_i$ , от коэффициентов влияния  $k_i$  и от заданного ресурса  $R$ .

б) Гиперболическое уравнение связи.

При ограниченных ресурсах, отражаемых гиперболическим уравнением связи, оптимальные погрешности косвенного измерения определяются выражением (6.34). Подставляя значения погрешностей в выражение (6.56), получим критерий для выбора оптимального способа косвенного измерения при ограничениях на стоимость.

$$L = \min \frac{1}{C^2} \left( \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\beta_i^2 k_i^2} \right)^3 \quad (6.64)$$

Выражения (6.63) и (6.64) также позволяют определить оптимальный способ косвенного измерения показателей без предварительных вычислений оптимальных погрешностей не-

посредственного измерения параметров. Выбор определяется долей затрат  $\beta_i$  стоимости на создание каждого из приборов и коэффициентами влияния  $k_i$  параметров на показатель объекта измерения.

#### 6.3.4. Обеспечение минимальной стоимости измерений при выборе совокупности параметров.

Для обратной оптимизационной задачи процедура выбора оптимального способа измерения остается прежней. Первоначально определяется для каждого возможного способа измерения, какой точности измерения можно достигнуть при минимальных затратах на приобретение приборов и при заданных ограничениях, а затем из всех возможных способов выделяется тот, для которого затраты минимальны. В соответствии с функционалом (6.35) критерием выбора оптимального способа измерения в этом случае является

$$L = \min(C - C_0) = \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\delta_i} \quad (6.65)$$

а). Линейное уравнение связи.

Линейное уравнение связано с приоритетом информации, которую оператор получает от того или иного прибора при управлении технологическим процессом. Чем более значима информация, тем важнее прибор (см. п. 5.3.3). Подставим в выражение (6.65) значения погрешностей  $\delta_i$  из формулы (6.37), которая справедлива для линейного уравнения связи и получим критерий выбора оптимального способа измерения.

$$L = \min \sum_{i=1}^m \sqrt{\lambda a_i \beta_i} \quad (6.66)$$

где неопределенный множитель Лагранжа вычисляется по формуле (6.38).

Из выражения (6.66) следует, что при необходимости осуществления минимальных затрат на приобретение приборов выбор оптимального способа измерения зависит от степени важности параметров  $a_i$  для управления и стоимостных характеристик приборов  $\beta_i$ . Этот вывод вполне согласуется со здравым смыслом, однако следует он из строгих математических выражений.

б) Квадратичное уравнение связи.

Квадратичное уравнение связи применяется в том случае, когда ограничения накладываются на погрешность измерения обобщенных показателей. В техническом задании на проектирование в требованиях по метрологическому обеспечению могут быть заданы допустимые погрешности измерения показателей или каких-либо параметров. Если эти показатели оценивать косвенным путем, то уравнение связи можно представить в виде квадратичного уравнения. Тогда возможно решение оптимизационной задачи: выбор способа косвенного измерения с точностью не меньше требуемой и с минимальной стоимостью приборов непосредственного измерения.

Также как и в предыдущих случаях, после подстановки значения погрешности из формулы (6.42) в выражение (6.65) получим критерий выбора оптимального способа измерения,

$$L = \min \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{2\lambda k_i^2 \beta_i^2}, \quad (6.67)$$

позволяющего максимально уменьшить затраты на закупку приборов и в то же время удовлетворяющего требованиям к заданным погрешностям измерения.

## 7. ДИНАМИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ.

При постановке задачи выбора оптимального способа измерения и при ее решении не принимались какие-либо допущения, которые ограничивают использование временных (динамических) характеристик в качестве уравнений (2.26), определяющих состояние объекта измерения. Уравнения динамики являются более сложными, но нет никаких принципиальных трудностей, не допускающих их применение.

Следует заметить, что при организации контроля в функции обслуживающего персонала входит наблюдение за качеством технологического процесса на установившихся режимах. На динамических режимах и наблюдение, и управление технологическими процессами осуществляется системами автоматического управления. Но в тех случаях, когда при построении систем автоматического управления имеется возможность использования различных вариантов измерительных устройств, проблема выбора оптимального способа измерения остается. Рассмотрим выбор оптимального способа измерения для динамических объектов контроля [61].

### 7.1. Наблюдаемость детерминированных динамических объектов.

Состояние динамического объекта управления описывается математической моделью в виде уравнений динамики. В векторной форме это уравнение имеет вид

$$\dot{x} = \phi[t, x(t), u(t)] \quad (7.1)$$



где  $x$  -  $n$ -мерный вектор фазовых координат, определяющий состояние объекта управления и принадлежащий некоторому открытому множеству  $X$ ;

$u$  -  $r$ - мерный вектор управления, принадлежащий множеству  $U$ ;

$t$  - текущее время, находящееся в промежутке  $T=[t_0 t_1]$ .

Оценка текущего состояния объекта управления (7.1) осуществляется с помощью  $m$ -мерного вектора наблюдения, принадлежащего множеству  $Y$ .

$$y(t) = C(t, x(t), u(t)) \quad (7.2)$$

Здесь  $C$  - оператор, отражающий конструкцию измерительных устройств.

Из уравнений (7.1) и (7.2) следует, что состояние динамического объекта характеризуется  $n$  параметрами и наблюдаются  $m$  контролируемые величины. Необходимо обосновать выбор измеряемых параметров, необходимых для оценки состояния объекта управления.

Для динамических объектов проблема наблюдаемости состоит в том, чтобы по результатам измерения параметров в настоящий момент восстановить состояние управляемого объекта в прошлом для принятия решения об управляющем воздействии на него. Объект считается наблюдаемым, если выполняются условия необходимости и достаточности наблюдаемого вектора  $y(t)$  для оценки состояния динамической системы (7.1) в определенный момент времени. Эти условия называют условиями наблюдаемости.

Условия необходимости наблюдения существуют в том случае, если по известной зависимости (7.2) для вектора наблюдения  $y(t)$  на отрезке времени  $[t_0, t_1]$  восстановить состояние объекта  $x(t_0)$  в начальный момент времени  $t_0$ .

Условия достаточности наблюдения определяются теоремой о минимальном числе контролируемых параметров динамической системы: минимальное число выходов наблюдае-

мой системы равно числу нетривиальных инвариантных многочленов транспонированной матрицы состояния [38].

Оба условия устанавливают возможность оценки состояния объекта по наблюдениям в определенной системе координат с минимальным базисом, но не позволяет выявить наилучший из возможных вариантов.

Заметим, что для статических объектов условия необходимости и достаточности выражаются проще. Для того, чтобы объект был наблюдаем, необходимо и достаточно, чтобы система уравнений, описывающих процессы, происходящие в нем, могла быть разрешима относительно всех переменных. Для этого количество входящих в систему уравнений величин прямого измерения было равно разности количества всех переменных, входящих в систему уравнений, и числа этих уравнений. В этом случае совокупность контролируемых параметров будет минимальна (см. п. 6.3.1).

Для динамических систем вектор наблюдения определяет разрешающую операцию [62] для каждой фазовой координаты вектора состояния. Они равны

$$\begin{aligned} x_1(t_0) &= \varphi_1[t, y(t)] \\ x_2(t_0) &= \varphi_2[t, y(t)] \\ &\dots\dots\dots \\ x_n(t_0) &= \varphi_n[t, y(t)] \end{aligned} \quad (7.3)$$

Функции (7.3) восстанавливают вектор  $x(t_0)$  в заданный момент времени  $t_0$  по наблюдениям вектора  $y(t)$  в интервале  $[t_0, t_1]$ .

Проблема наблюдаемости занимает важное место в теории оптимального управления главным образом ввиду ее прикладной направленности. В настоящее время она успешно решается для линейных и некоторых нелинейных систем. Работы, посвященные проблеме наблюдаемости, в основном направлены на изучение общей задачи наблюдаемости, сформулированной Р.Калманом, и на разработку способов оценки текущего состояния динамической системы.

Точность оценки вектора состояния определяется только погрешностью наблюдаемого сигнала и зависит от вида разрешающих операций. Среди разрешающих операций существует оптимальная операция, которая имеет минимум какой либо конкретной нормы [62]. Несмотря на то, что оценка текущего состояния в этом случае производится по конечным формулам, тем не менее, даже для линейных систем высокого порядка могут возникнуть существенные трудности, связанные с вычислением обратной матрицы.

Другим направлением теории оптимального управления, имеющим целью оценку текущего состояния, является использование наблюдающего устройства, построенного в виде фильтра. Задача построения такого устройства формулируется следующим образом: необходимо найти оценку, являющуюся линейной функцией от результатов наблюдения в прошлом и минимизирующую значение среднеквадратической ошибки оценивания переданного сигнала.

И в том и в другом случае для оценки текущего состояния используется вектор наблюдения, связанный с вектором состояния известными функциями (7.2), определенными конструкцией измерительных средств. При разработке наблюдающих устройств может появиться возможность использования нескольких способов измерения. Тогда возникает задача выбора оптимального варианта.

С качественной точки зрения оптимальная совокупность измерительных устройств должна удовлетворять экстремальному значению критерия качества восстановления вектора состояния, т.е. минимуму суммы квадратов погрешностей, возникающей при оценке вектора состояния. Задача состоит в том, чтобы среди всех технически реализуемых вариантов выделить такой, который удовлетворяет критерию качества восстановления наилучшим образом.

Предлагаемый подход имеет такой же критерий оптимальности, как и используемый в фильтре Калмана. Различие заключается в том, что наблюдающее устройство проектируется так, чтобы удовлетворять критерию, а возможности его технической реализации не рассматриваются. Здесь же предлага-

ется найти оптимальный вариант измерительного комплекса среди всех возможных вариантов.

На правомерность предлагаемого подхода указывает теорема о существовании минимального числа  $m$  выходов динамической системы. Пусть число выходов динамической системы, которые можно измерить равно  $m'$ . Очевидно, что при  $m > m'$  наблюдение системы осуществить невозможно, а при  $m < m'$  возможны различные варианты измерительного комплекса, и можно предположить наличие среди них наилучшего, с помощью которого достигается минимальная среднеквадратическая ошибка оценки состояния. Таким образом, возникает задача оптимального наблюдения.

## 7.2. Постановка задачи оптимального наблюдения.

Пусть для наблюдения динамического объекта (7.1) имеется  $l$  вариантов измерительного комплекса  $y_k(t)$  ( $k=1, \dots, l$ ). Они отличаются между собой тем, что, с одной стороны, используются различные векторы наблюдения, с другой стороны, имеются ограничения по их применению. Каждый из векторов обеспечивает полную наблюдаемость объекта. Поэтому все варианты являются правомерными, но в каждом случае оценка состояния производится на основе измерений в системе координат, соответствующей вектору наблюдения. Ограничения на применение того или иного комплекса вызваны стоимостью, массой, габаритами приборов и т.п., и отражаются соотношениями между погрешностями измерения (6.3)

$$\psi_r(\delta_1, \dots, \delta_m) = 0 \quad r = 1, \dots, p$$

С учетом сказанного постановка задачи выбора оптимального наблюдения может быть сформулирована следующим образом.

Пусть для динамической системы (7.1) выполняются условия теоремы Калмана, и она полностью наблюдаема в любой из  $l$  систем координат. Для каждой системы координат имеем функцию

$$\delta = \varphi_k(\delta_1, \dots, \delta_m) \quad k = 1, \dots, l \quad (7.4)$$

от  $m$  переменных, заданных в положительной области  $D$ . В качестве функции (7.4) возьмем положительно определенную квадратичную форму (6.23), в которой компоненты метрического тензора многообразия в виде разрешающих операций (7.3) соответствуют  $k$ -тому вектору наблюдения. Кроме того, на переменные  $\delta_1, \dots, \delta_m$  наложено  $p$  ( $p < m$ ) дополнительных условий в виде уравнений связи (6.3).

Пусть значения переменных  $\delta_1, \dots, \delta_m$  определяют внутреннюю точку области  $D$ . Каждый из  $l$  функционалов (7.4) в точке  $(\delta_1^0, \dots, \delta_m^0)$  имеет условный минимум, если неравенство

$$\varphi_k(\delta_1, \dots, \delta_m) > \varphi_k(\delta_1^0, \dots, \delta_m^0)$$

выполняется в некоторой окрестности точки  $(\delta_1^0, \dots, \delta_m^0)$  при условии, что  $(\delta_1, \dots, \delta_m)$  и  $(\delta_1^0, \dots, \delta_m^0)$  удовлетворяют уравнениям связи (6.3).

Перебирая все доступные для технической реализации системы координат, получим  $l$  условных минимумов целевой функции (7.4). Оптимальным измерительным комплексом будет тот, для которого условный минимум суммарной погрешности, полученной при оценке состояния динамической системы (7.1) и измерителя (7.2) является наименьшим. Значения переменных, удовлетворяющих условному минимуму, являются оптимальными погрешностями координат вектора наблюдения.

### 7.3. Линейная стационарная динамическая система.

Пусть динамический объект управления (7.5) и его измерительный комплекс (7.6) представляют собой линейную стационарную систему, которая описывается математической моделью в матричном виде

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Vi(t) \quad (7.5)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (7.6)$$

где  $A, B, C, D$  - постоянные матрицы размерности соответственно  $n \times n, n \times r, m \times n, m \times r$ .

Для проверки на наблюдаемость линейной стационарной системы составляется матрица  $K$ .

$$K = [C' \ A'C' \ A'^2C' \ \dots \ A'^{n-1}C'] \quad (7.7)$$

Система считается наблюдаемой, если для нее ранг матрицы  $K$  равен  $n$ . Для наблюдаемой системы существуют такие разрешающие операции, которые ввиду линейности системы (7.5) также являются линейными. Они имеют вид

$$x(t_0) = V \cdot y(t) \quad (7.8)$$

Здесь  $V$  - линейный оператор с элементами  $v_{si}$ , отражающий разрешающие операции  $(s, i = 1, \dots, n)$ . По существу здесь производится косвенное измерение параметров состояния путем непосредственного измерения вектора наблюдения  $y(t)$  и использования выражения (7.8) с оператором  $V$ .

Значения элементов линейного оператора и его структура определяются фундаментальной матрицей динамического объекта (7.5) и матрицей  $C$  измерительного комплекса (7.6).

Для стационарной системы можно взять любое время для оценки состояния. Для определенности примем, что  $t = t_0$ . Так как управляющее воздействие  $u(t)$  измеряется, и коэффициенты математической модели (7.5) и измерительного комплекса (7.6) известны, то можно ограничиться случаем, когда управляющее воздействие отсутствует, т.е.  $u(t) \equiv 0$ . В этом случае вектор наблюдения  $y(t)$  связан с вектором состояния  $x(t_0)$  линейной зависимостью

$$y(t) = CX(t, t_0)x(t_0) \quad (7.9)$$

где  $X(t, t_0)$  - фундаментальная матрица динамического объекта (7.5), являющаяся решением дифференциального уравнения (7.5).

Из выражения (7.8) следует, что для определения состояния объекта в начальный момент времени необходимо найти значения элементов оператора  $V$ .

Рассмотрим два случая.

1. Пусть размерность вектора состояния и вектора наблюдения одинаковая, т.е.  $n = m$ .

В этом случае оператор  $V$  легко находится из выражения (7.9) как обратная матрица произведения двух матриц  $C$  и  $X$ . Он равен

$$V = [CX(t, t_0)]^{-1}$$

Этот случай тривиален и не представляет интереса для нахождения оптимального решения.

2. Пусть размерность вектора наблюдения меньше, чем вектора состояния, т.е.  $m < n$ .

В этом случае возможны различные варианты построения измерительного комплекса, отличающиеся друг от друга оператором  $V$ , с помощью которого можно выбрать оптимальный вариант.

Вариант 1.

Наблюдаемый объект равномерно наблюдается через определенные равные промежутки времени  $\Delta t$ . Тогда количество различных вариантов измерительных комплексов равно числу сочетаний из  $n$  по  $m$ , и они будут иметь различные операторы  $V$ .

Вариант 2.

Наблюдаемый объект может наблюдаться в любой момент времени. Тогда можно выбрать такие моменты для наблюдения, когда будет максимальная точность наблюдения. Для динамического объекта управления каждому моменту времени соответствует свой оператор  $V$ , и, следовательно, можно выбрать для измерения такой момент времени  $t$ , когда наблюдение наиболее эффективно, т.е. состояние объекта управления в момент времени  $t_0$  определяется с максимальной точностью.

Для равномерно наблюдаемого объекта [63], у которого состояние  $x(t)$  в момент времени  $t_0$  может быть определено по известному выходу динамического объекта  $y(t_0)$ , а в этот момент времени  $t = t_0$ , матрица  $V$  равна псевдообратной матрице, определяющей уравнение (7.9)

$$V = [CX(t, t_0)]^{\oplus} = \left( [CX(t, t_0)] [CX(t, t_0)]^T \right)^{-1} [CX(t, t_0)]^T \quad (7.10)$$

Псевдообратная матрица (7.10) дает наилучшее приближенное решение матричного уравнения (7.9) по методу наименьших квадратов [57].

Для второго варианта можно использовать условие задачи о наблюдаемости. Оно позволяет производить измерения в любой момент времени в интервале  $[t_0, t_1]$ . Алгоритм измерения состоит в следующем.

Произведем измерение вектора  $y(t)$  в момент времени  $t_0$ . Из выражения (7.9) получим систему уравнений с неизвестными  $x(t_0)$ . В матричной форме система имеет вид

$$y(t_0) = CX(t_0, t_0)x(t_0) \quad (7.11)$$

Так как  $m < n$ , то для решения системы уравнений (7.11) относительно вектора состояния  $x(t_0)$  к ним необходимо добавить еще  $(m-n)$  уравнений. Их можно получить после измерения вектора  $y(t)$  в момент времени  $(t + \Delta t)$

$$y(t_0 + \Delta t) = CX(t_0 + \Delta t, t_0)x(t_0) \quad (7.12)$$

Количество дополнительных уравнений (7.12) обуславливается условиями необходимости и достаточности наблюдения вектора  $y(t)$ . Совместное решение уравнений (7.11) и (7.12) дает оценку состояния динамической системы (7.5) и (7.6), а оператор, определяющий это решение, представляет собой в соответствии с (7.8) искомый оператор  $V$ .

Соотношение чисел  $m$  и  $n$  позволяет определить число замеров вектора наблюдения или отдельных его составляющих в интервале  $[t_0, t_1]$ . При делении  $n$  на  $m$  без остатка частное от



деления указывает на необходимое число замеров всех составляющих вектора наблюдения. Если частное от деления не целое число, то остаток от деления показывает, сколько составляющих вектора  $y(t)$  необходимо измерить во время последнего замера.

Заметим, что выбор составляющих в этом случае может осуществляться произвольно, с единственным условием об удовлетворении критерию наблюдаемости (7.7). При выполнении этого условия могут возникнуть различные варианты. Это еще раз подтверждает необходимость выбора оптимального варианта.

Наибольшее число замеров в интервале  $[t_0, t_1]$  необходимо произвести при  $m = 1$ , когда измеряемая величина  $y(t)$  является скалярной величиной. Здесь число замеров должно быть равно размерности вектора состояния, причем один из них производится в момент времени  $t_0$ , а остальные  $(n-1)$  замеры – в интервале  $[t_0, t_1]$ . Особый интерес представляет одновременное измерение составляющих вектора наблюдения и всех их производных до порядка  $(n-1)$  включительно. В этом случае считается, что все измерения производятся не в промежутке времени  $\Delta t = t_1 - t_0$ , а в момент времени  $t_0$ , т.е.  $\Delta t = 0$ .

Для линейной стационарной динамической системы с постоянными коэффициентами уравнение (7.11) имеет вид [64]

$$y(t) = Ce^{At}x(t_0) \quad (7.13)$$

Найдем выражения для  $(n-1)$  производных, которые необходимо измерить косвенным путем. Для этого продифференцируем выражение (7.13) в момент времени  $t_0 = 0$ . В результате имеем

$$\begin{aligned} y(0) &= Cx(0), \quad \dot{y}(0) = CAx(0), \\ \ddot{y}(0) &= CA^2x(0), \dots \end{aligned} \quad (7.14)$$

Выберем соответствующие компоненты векторов (7.14) таким образом, чтобы объект управления (7.1, 7.2) удовлетворял критерию наблюдаемости. Тогда состояние динамического объекта может быть оценено с помощью выражения [64]

$$x(0) = K_H^{-1} \hat{y} \quad (7.15)$$

где  $\hat{y}$  - вектор-строка, состоящая из компонентов векторов (7.14).

$K_H^{-1}$  - неособая матрица размерности  $(n \times n)$ , оставленная из столбцов матрицы  $K$  (7.7), соответствующих вектору  $\hat{y}$ .

Если  $y(t)$  - скалярная величина, то выражение (7.15) примет вид

$$x(0) = [C' A' C' A'^2 C' \dots A'^{(n-1)} C']^{-1} \quad (7.16)$$

Из выражения (7.16) следует, что при наблюдении динамического объекта (7.1) с помощью скалярной величины  $y(t)$  ( $m = 1$ ) при  $\Delta t = 0$  линейный оператор  $V$  равен обратной матрице наблюдаемости (7.7). Этот результат интересен тем, что он показывает физический смысл матрицы наблюдаемости.

Таким образом, при оценке состояния динамического объекта могут иметь место различные варианты измерительных комплексов, а также всевозможные алгоритмы измерения. В любом случае разрешающие операции отличаются оператором  $V$ . Поэтому выбор оптимального варианта сводится к анализу структуры этого оператора. Его можно произвести, используя рассмотренный выше метод выбора оптимального способа измерения.

Найдем компоненты метрического тензора. Для линейной стационарной динамической системы оператор  $V$  также является линейным. Для линейного оператора  $V$  компоненты метрического тензора определяются суммой произведений  $i$ -того и  $k$ -того столбцов этого оператора (см. п. 2.3)

$$\begin{aligned} G_{ii} &= 1 + \sum_{s=1}^h v_{si}^2 \\ G_{ik} &= \sum_{s=1}^h v_{si} v_{sk} \end{aligned} \quad (7.17)$$

где  $v_{si}$  - элементы матрицы  $V$  ( $i, k, s = 1, \dots, n$ ).

Метрический тензор полностью характеризует метрические свойства линейного динамического объекта (7.1) в координатах вектора наблюдения в заданный момент времени  $t_0$ .

После определения метрического тензора для каждого из сравниваемых измерительных комплексов нетрудно найти оптимальный вариант, для оценки состояния системы (7.1, 7.2) в момент времени  $t_0$ , пользуясь формулами, полученными в п.б.

В соответствии с выражениями (7.8, 7.11, 7.12) компоненты метрического тензора зависят как от момента времени  $t_0$ , для которого определяется текущее состояние динамической системы, так и от интервала наблюдения  $\Delta t$ . Варьируя этими переменными, можно определить тот момент времени и такой интервал наблюдения, когда текущее состояние динамической системы определяется с максимальной точностью при одном и том же ограничении на ресурсы.

Изложенный выше подход к выбору оптимального измерительного комплекса может использоваться и в том случае, если текущее состояние необходимо определять в течение всего переходного процесса. При такой постановке задачи необходимо разбить время переходного процесса на ряд промежутков времени и для каждого произвести соответствующие расчеты. Критерий выбора оптимального варианта здесь должен быть интегральным.

Пример.

Рассмотрим линейную стационарную систему (7.1), которая характеризуется трехмерным вектором  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$  и матрицей  $A$ , равной

$$A = \begin{vmatrix} 3 & -1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 2 \end{vmatrix}$$

Пусть вектор наблюдения (7.2) состоит из двух координат  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ , а восстановление вектора состояния также может осуществляться двумя способами, т.е. имеем две матрицы  $C$

$$C_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$C_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{vmatrix}$$

В обоих случаях ранг матрицы  $K$  равен трем и, следовательно объект полностью наблюдаем.

Найдем линейный оператор  $V$ . Фундаментальная матрица для рассматриваемого примера имеет вид

$$X(t, t_0) = \begin{vmatrix} (1+t)e^{2t} & te^{2t} & te^{2t} \\ (1+t)e^{2t} - e^t & e^t - te^{2t} & te^{2t} \\ e^{2t} - e^t & e^t - e^{2t} & e^{2t} \end{vmatrix}$$

По условиям задачи о наблюдаемости измерения можно производить в промежутке времени  $t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$ . Необходимо произвести три измерения. Пусть результаты измерения равны  $y_1(t_0)$  и  $y_2(t_0)$  в момент времени  $t_0$  и  $y_2(t_0 + \Delta t)$  через промежуток времени  $\Delta t$ . Для удобства примем для этих величин обозначения  $y_1, y_2, y_3$ . Они связаны с координатами вектора состояния  $x_1(t_0), x_2(t_0), x_3(t_0)$  соотношениями (7.11, 7.12). С помощью фундаментальной матрицы и матриц  $C_1$  и  $C_2$  найдем линейные операторы  $V_1$  и  $V_2$  для обоих измерительных комплексов при  $t_0 = 0$  и  $\Delta t = 1$ . Они равны произведению этих матриц.

$$V_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -2 & 1 & 0,14 \end{vmatrix} \quad V_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,79 & 0,107 \\ 0 & 1 & 0,14 \end{vmatrix}$$

Используя формулы (2.29), рассчитаем компоненты метрического тензора, представляющего собой симметричную

квадратную матрицу третьего порядка. Для сравниваемых измерительных комплексов он равен

$$G_1 = \begin{vmatrix} 6 & -2 & -0,28 \\ -2 & 3 & 0,14 \\ -0,28 & 0,14 & 1,02 \end{vmatrix}$$

$$G_1 = \begin{vmatrix} 3 & 0,79 & -0,107 \\ 0,79 & 1,87 & -0,084 \\ -0,107 & 0,084 & 1,01 \end{vmatrix}$$

Для определенности предположим, что эффективность управления объектом оценивается коэффициентом полезного действия, а измеряемыми координатами являются температура и давление рабочего тела в одном измерительном комплексе, а в другом измерительном комплексе - давление и расход рабочего тела. Чем точнее измеряются эти величины, тем меньше отклонение к.п.д. от максимального значения. При малых отклонениях измеряемых величин от расчетного значения имеем линейные уравнения связи, которые характеризуют потери для каждого из измерительных комплексов.

$$R_1 - \sum_{i=1}^3 a_i \delta_i = 0 \quad R_2 - \sum_{i=1}^3 b_i \delta_i = 0$$

Коэффициенты  $a_i, b_i$  при переменных  $\delta_i$  характеризуют чувствительность к.п.д. к отклонениям параметров состояния  $x_1, x_2, x_3$ . Примем, что для обоих способов измерения ограничения равны  $R_1 = R_2$ , а величины  $x_1, x_2, x_3$  оказывают одинаковое влияние на к.п.д.,  $a_i = b_i = 0,22$ .

Для решения задачи должны быть известны коэффициенты парной корреляции между погрешностями измерения  $\delta_i$ . Предположим, что для величин  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  корреляционная матрица равна

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Подобная матрица характерна для переменных статистически не связанных между собой. При отсутствии статистической связи формулы для расчетов оптимальной погрешности измерения и критерия выбора оптимального измерительного комплекса имеют вид

$$\delta_i^0 = \frac{R_{1,2} \frac{a_i}{G_{ii}}}{\sum_{i=1}^m \frac{a_i}{G_{ii}}} \quad L = \min \frac{(R_{1,2})^2}{\sum \frac{a_i^2}{G_{ii}}} \quad (7.18)$$

В таблице 7.1 представлены результаты расчетов по формулам (7.18) при оценке текущего состояния системы в момент времени  $t_0 = 0$ , а также в моменты времени  $t_1 = 1$  и  $t_2 = 2 \Delta t = 1$ . Анализ результатов показывает, что для первого варианта критерий выбора оптимального комплекса в любой момент времени меньше, чем для второго варианта. Следовательно, этот вариант является оптимальным.

Таблица 7.1.

Наименование величины	Номер варианта	Обозначение	$t_0 = 0$	$t_1 = 1$	$t_2 = 2$
Критерий выбора комплекса	1	$L_1$	122,3	209,7	242,1
	2	$L_2$	153,5	232,7	245,8
Погрешность оценки состояния	1	$\delta$	11,05	14,5	15,6
	2	$\delta$	12,4	15,2	15,7
Оптимальная погрешность измерения	1	$\delta_1$	1	2,7	3
		$\delta_2$	2	2,9	3
		$\delta_3$	6	3,4	3

Физическая интерпретация полученного результата заключается в следующем. При одних и тех же потерях ( $R_1=R_2=2$ ) погрешность оценки текущего состояния в момент

времени  $t_0 = 0$  в первом случае равна  $\delta = 11,05$ , во втором случае -  $\delta = 12,4$ , т.е. на 12% больше. Выигрыш получается за счет перераспределения погрешностей измерения величин  $y_1, y_2, y_3$ . Наиболее точно необходимо измерять величину  $y_1(t_0)$ , в то время как величину  $y_2(t_0 + \Delta t)$ , т.е. через промежуток времени  $\Delta t = 1$ , можно измерять в 6 раз грубее.

Из таблицы следует, что погрешность оценки состояния зависит от времени замера. Для рассматриваемого примера наиболее точно должно оцениваться состояние при  $t_0 = 0$ , и с течением времени точность оценки состояния можно снизить, но потери эффективности при этом не произойдет. Отметим, что приведенные в таблице погрешности измерения являются оптимальными. Выбор других погрешностей измерения при соблюдении условий уравнения связи приведет к увеличению погрешности оценки состояния. Это можно проверить непосредственно расчетом.

## **8. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ.**

### **8.1. Метрологическая аттестация алгоритмов.**

В процессе эксплуатации при выработке управляющих воздействий главным и определяющим в принятии решения является анализ тех сведений, которые поступают обслуживающему персоналу. Использование систем информационной поддержки в составе информационно-измерительных систем предусматривает разработку алгоритмов обработки измерительной информации [65]. Они представляют собой однозначное описание последовательности операций над исходными данными, полученными при измерениях, и направлены на получение результата, полностью определяемого этими исходными данными.

Алгоритмы могут включать в себя статистическую обработку многократных отсчетов, расчеты обобщенных показателей, экстраполяцию характеристик оборудования, прогнозирование его технического состояния и другие вычислительные процедуры. Все эти операции требуют метрологического обеспечения, подтверждающего достоверность обрабатываемой информации и, следовательно, обосновывающего правильность принятых решений.

Алгоритмы обработки информации должны проходить соответствующую аттестацию для обоснования его выбора и применения. В результате аттестации оцениваются основные характеристики алгоритма. Кроме того, алгоритмы должны сопровождаться операциями, оценивающими характеристики погрешностей результатов обработки. Поэтому аттестация алгоритмов рассматривается в двух аспектах: общая (исследовательская) и конкретная (метрологическая).



Если алгоритм рассматривается как самостоятельный объект и может применяться для обработки исходных данных с различными свойствами, то выполняется общая (исследовательская) аттестация алгоритма.

Если алгоритм рассматривается как составная часть прикладного программного обеспечения конкретных устройств, ИВК, ИИС, ИУС, методики выполнения измерений, и имеется значительная априорная информация об исходных данных, то выполняется конкретная (метрологическая) аттестация.

Метрологическая аттестация алгоритма - это исследование точностных свойств алгоритма в рамках конкретной измерительной задачи или методики выполнения измерения (МВИ). Целью аттестации является оценивание характеристик составляющих погрешностей, получаемых при обработке результатов измерений. К основным характеристикам точности алгоритмов относятся:

- границы методической составляющей погрешности;
- границы систематических составляющих погрешности результата измерения;
- среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности.

Методическая погрешность результата измерения обусловлена неидеальностью алгоритма обработки данных. Она появляется в результате использования в алгоритме аппроксимирующих зависимостей, замены нелинейностей линейными моделями, принятия закона распределения случайных величин, из-за ограниченной выборки исходных данных и пр. Ее можно определить, применяя алгоритм для обработки исходных данных, не содержащих погрешностей, или используя различные варианты допущений при условии точного выполнения всех арифметических и логических операций.

Систематическая погрешность обусловлена особенностями работы алгоритма в конкретной вычислительной задаче, например:

- при округлении промежуточных результатов;
- из-за ограниченности разрядной сетки;
- при дискретизации по аргументу;

- из-за конечного числа итераций;
- при использовании конечных разложений в ряд и др.

Исключение систематических составляющих погрешностей производится путем внесения поправок. Для определения поправки рекомендуется использовать модели в виде детерминированных функций или последовательностей. Например, в виде следующих функций:

- постоянной;
- линейной;
- синусоидальной.

Случайная погрешность обусловлена наличием погрешностей исходных данных, поступающих на обработку, и их преобразованием с помощью алгоритма. Ее называют трансформированной случайной погрешностью. Методы определения трансформированных погрешностей зависят от применяемых вычислительных операций. Преобразование погрешностей исходных данных при использовании алгоритма происходит в результате использования различных вычислительных процедур, например:

- в виде метода наименьших квадратов;
- при экстраполяции функций;
- при прогнозировании характеристик оборудования.

Во время проектирования алгоритм рассматривается как составная часть прикладного программного обеспечения конкретных устройств, ИВК, ИИС, ИУС или методики выполнения измерений. Поэтому все вопросы, связанные с оценкой рассмотренных выше погрешностей, необходимо решать в процессе метрологического исследования объекта измерения для которого разрабатывается алгоритм.

## **8.2. Статистическая обработка многократных отсчетов.**

При принятии решения об использовании технических средств в условиях эксплуатации обслуживающий персонал должен быть уверен, что погрешность измерений не превышает

ет требуемый уровень. Эта уверенность базируется на том основании, что при проектировании выбор средств измерения осуществляется в соответствии с метрологическими требованиями (см. п.1.3). Эти требования предусматривают, что погрешность измерения в процессе эксплуатации не превышает заданную погрешность. В подобном подходе заложена некоторая некорректность, связанная с увеличением погрешности средства измерения как от их старения, так и от влияния эксплуатационных условий.

Погрешность средств измерения, установленных на корабле, можно определить, пользуясь паспортными данными. Но в этом случае расчеты по оценке погрешности измерения основаны на использовании результатов поверки, проведенной в начальный период межповерочного интервала. Кроме того, условия поверки отличаются от условий эксплуатации. Поэтому естественно предположить, что при принятии решения лучше основываться не на старых сведениях, полученных во время очередной поверки, а на сведениях, полученных путем статистической обработки результатов измерений в конкретных условиях эксплуатации.

В то же время статистическая обработка многократных отсчетов требует дополнительных материальных и временных затрат. Поэтому необходимо обоснование использования алгоритмов статистической обработки в информационно-вычислительных комплексах. Учитывая, что статистическая обработка производится из-за разброса исходных данных, для обоснования необходимости ее проведения достаточно выявить причины случайного разброса значений параметров, характеризующих объект измерения.

Известно, что процесс измерения всегда связан с некоторой неопределенностью, которая характеризуется погрешностью измерения. Но, кроме этой причины разброс исходных данных вызывается еще и невоспроизводимостью от опыта к опыту технологического процесса в самом объекте измерения. На него оказывают влияние самые разнообразные факторы, начиная от погодных условий и заканчивая вибрацией корпуса корабля. Таким образом, случайный разброс исходных данных

вызывается погрешностью средств измерения  $\Delta_{СИ}$  и диффузностью объекта измерения  $\Delta_{ОИ}$ . Эти погрешности можно считать некоррелированными. Тогда суммарная неопределенность исходных данных характеризуется суммой [18]

$$\Delta_{ИД} = \sqrt{\Delta_{СИ}^2 + \Delta_{ОИ}^2} \quad (8.1)$$

При обосновании необходимости статистической обработки результатов измерений необходимо иметь в виду три случая.

1.  $\Delta_{СИ} \ll \Delta_{ОИ}$ . При этом ввиду малости погрешности средств измерения результирующий разброс будет характеризоваться только диффузностью объекта измерения. Статистическая обработка результатов измерений будет способствовать повышению точности измерений и поэтому является целесообразной.

2.  $\Delta_{СИ} = \Delta_{ОИ}$ . Суммарная погрешность будет равна  $1,4 \Delta_{ОИ}$ , т.е. на 40% больше по сравнению с предыдущим случаем. Поэтому в данном случае статистическая обработка является еще более целесообразной.

3.  $\Delta_{СИ} \gg \Delta_{ОИ}$ . Суммарная погрешность полностью определяется погрешностью средств измерений. Если ее значение удовлетворяет требованиям метрологического обеспечения  $\Delta_{СИ} < \Delta_{ТР}$ , то нет никакой нужды в организации статистической обработки исходных данных.

Если в результате обоснования принимается решение о необходимости статистической обработки результатов измерения, то в алгоритмическое обеспечение информационно-вычислительных систем включается соответствующий алгоритм обработки многократных отсчетов. В нем должны решаться следующие задачи:

– оценивание случайной погрешности многократных отсчетов, т.е. определение области неопределенности фиксируемых показаний с помощью среднеквадратического отклонения генеральной совокупности отсчетов;

- нахождение более точного, усредненного результата измерения и сравнение его с допустимым значением измеряемой величины в соответствии с правилами эксплуатации,
- оценивание погрешности полученного усредненного результата, которая в  $(\sqrt{n})$  раз меньше среднеквадратического отклонения отдельного измерения, и сравнение этой погрешности с требуемым значением, указанным в требованиях по метрологическому обеспечению.

Решение первой задачи позволяет определить доверительный интервал исходных данных при заданной в техническом задании доверительной вероятности. Результаты решения второй и третьей задач необходимы для обеспечения выполнения правил эксплуатации оборудования.

Методы статистической обработки результатов измерений известны и хорошо освещены в научно-технической литературе [18, 46, 71]. Они сводятся к определению числовых оценок параметров соответствующих законов распределения (координаты центра распределения, оценок ширины и формы распределения). При этом предполагается неизменность закона распределения в процессе измерения. На основе этих методов разработаны пакеты прикладных программ, позволяющих оценивать параметры законов распределения.

При использовании пакетов прикладных программ в алгоритмах информационно-вычислительных систем необходимо учитывать метрологические аспекты исходных данных, которыми являются результаты измерений. К таким аспектам следует отнести:

- влияние закона распределения погрешностей измерения на эффективность оценки среднего значения,
- назначение границ цензурирования выборки,
- необходимость исключения или учета систематической погрешности измерения.

Анализ перечисленных аспектов и соответствующая корректировка исходных данных должны проводиться по результатам метрологического исследования объекта измерения.

До последнего времени было общепринятым, что погрешности измерения всегда распределены нормально. Поэтому задача определения формы распределения погрешностей не ставилась. В настоящее время факт разнообразия законов распределения установлен и признан законодательно. В результате стандартизированы модели равномерного, трапециидального, треугольного, нормального и двухмодального распределений.

От вида закона распределения зависят способы определения их параметров и эффективность их оценки. Под наиболее эффективной оценкой понимают такое определение параметра распределения, которое имеет наименьшую дисперсию. Рассмотрим влияние закона распределения на эффективность оценки более подробно.

Известно [18] несколько способов оценки усредненного значения многократных отсчетов: среднее арифметическое значение, медиана, центр размаха и др. Традиционно среднее значение определяется как среднеарифметическое значение. Однако доказано [18], что такой способ является эффективным только для законов распределения, близких к нормальному закону. Для островершинных распределений (треугольное) более эффективно использование медианы. Этот способ позволяет определить такое усредненное значение, слева и справа от которого вероятности появления различных значений случайной величины равны между собой и составляют  $P_1 = P_2 = 0,5$ . Для ограниченных распределений (равномерное, трапециидальное) эффективной является наиболее простая оценка центра распределения в виде центра размаха измеренных значений, т.е. в виде половины суммы крайних членов выборки.

Отсюда следуют прямые рекомендации по созданию алгоритмов статистической обработки многократных отсчетов. Переход к наиболее эффективным оценкам усредненных оценок результатов измерений позволяет сократить количество отсчетов в десятки раз.

Оценка среднеквадратического отклонения также зависит от вида закона распределения. Так, для его определения с точностью до 10% при равномерном распределении необходи-

мое число отсчетов равно  $n=20$ , а при нормальном распределении оно равно  $n=50$ .

Указанные выше свойства статистических оценок параметров распределений показывают, что вид закона распределения оказывает существенное влияние на объем выборки, а, следовательно, на трудоемкость и на время, необходимые для сбора исходных данных. Поэтому вид закона распределения значений контролируемых параметров должен определяться априорно на этапах метрологического исследования объекта измерения.

Одним из условий правомерности статистической обработки многократных отсчетов является требование однородности выборки, т.е. принадлежности всех ее членов к одной и той же генеральной совокупности. На практике это требование может нарушаться по причинам, независящим от обслуживающего персонала, а из-за возникновения новых обстоятельств, существенно влияющих на результаты измерений. Поэтому в алгоритмах статистической обработки необходимо предусматривать операции позволяющие выявить среди обрабатываемых данных “чужие” отсчеты, не принадлежащие к генеральной совокупности.

Формальным единственным признаком “чужого” наблюдения является его аномально большое удаление от центра распределения. Поэтому крайние, значительно удаленные от центра наблюдения отсчеты необходимо отбрасывать, т. е. цензурировать выборку. (Причину появления большого отклонения в алгоритмах статистической не выясняют, т.к. поиск ее относится уже к другим алгоритмам).

В инженерной практике для цензурирования используют “правило  $3\sigma$ ”, и отбрасываемые отсчеты относят к промахам. При необходимости использования более точного критерия следует учитывать объем выборки и даже вид закона распределения [18, 71]. Так, если для нормального закона распределения при  $n=100$  появление отсчета, отклоняющегося от центра распределения на  $3\sigma$  можно считать промахом, то для равно-

мерного распределения промахом является отсчет с отклонением на  $1,8\sigma$ .

В любом случае алгоритм обработки должен включать в себя итерационную процедуру: после выбрасывания промахов снова производится оценка параметров выборки.

Статистическая обработка многократных отсчетов позволяет повысить точность результата измерений, но при использовании этого результата необходимо помнить, что при усреднении уменьшаются лишь случайные погрешности. Систематическая погрешность, присутствующая во всех усредняемых отсчетах, остается без изменений. Эту особенность систематических погрешностей необходимо иметь в виду в алгоритмах статистической обработки. Случайная погрешность измерений может быть уменьшена во много раз, и стать ничтожно малой, однако погрешность усредненного результата будет характеризоваться не этой малой погрешностью, а систематической составляющей погрешности, значение которой не зависит от числа усредняемых отсчетов.

Алгоритмы статистической обработки должны предусматривать процедуры, исключающие систематические погрешности. Они могут базироваться на двух подходах: на внесении поправок в результат измерения или на коррекции измерительных каналов.

В первом случае на основе анализа средств и объекта измерений на этапах метрологического исследования составляются таблицы поправок для каждого значения измеряемой величины в диапазоне измерений. Такие же таблицы поправок составляются и для дополнительных погрешностей для каждой из влияющих величин: температуры окружающей среды, атмосферного давления в помещении, где производятся измерения, параметров источника питания приборов и т.д. Указанные поправки вносятся в результаты расчетов. Но такое исключение систематических погрешностей трудоемко само по себе.

Во втором случае можно использовать сквозную поверку каналов измерения ИИС или ИВК с помощью образцовых мер или образцовых сигналов непосредственно на месте находке-



ния объекта. По результатам поверки производится коррекция нуля и чувствительности канала. Она позволяет устранить накопившиеся к данному моменту прогрессирующие погрешности без выяснения причин их вызывающих. Если подобную коррекцию проводить перед каждым вводом энергетической установки в действие или перед каждым измерением, то эффект снижения погрешности усредненного результата может быть очень значительный, повышающий точность измерения в десятки раз.

Однако и в этом случае нельзя считать, что систематические погрешности полностью исключены. Остаются так называемые неисключенные систематические погрешности, в том числе вызываемые классом точности приборов. Здесь возможны три случая [71].

1. Пусть производится измерение физической величины, и прибор показывает одно и то же значение. Это значит, что случайная составляющая  $\sigma$  погрешности измерения равна нулю, и результирующая погрешность  $\theta$  измерения определяется только классом точности прибора.

2. Пусть в процессе измерений окажется, что при каждом отсчете получается новое значение физической величины. Причем имеет место такой разброс значений, который значительно превышает погрешность прибора. Очевидно, в этом случае погрешность измерения определяется только среднеквадратическим отклонением от центра распределения.

3. Могут быть и промежуточные случаи, когда необходимо учитывать случайные и систематические составляющие погрешности. Здесь необходимо помнить, что систематическая погрешность может складываться только с доверительным значением погрешности, т.е.

$$\delta_{\Sigma} = \theta + t\sigma \quad (8.2)$$

Для подобных случаев алгоритм статистической обработки должен предусматривать процедуру, определенную ГОСТ 8.207-76. Он устанавливает, что если  $\theta < 0,8\sigma$ , то следует пренебречь систематической составляющей погрешности и учитывать только случайную погрешность усредненного ре-

зультата. Если  $\theta > 8\sigma$ , то следует пренебречь случайной составляющей и усредненный результат характеризовать лишь его систематической составляющей. В промежуточных случаях границу погрешности результата рассчитывают по эмпирической формуле [18, 66]:

$$\lambda = \frac{t \cdot \sigma(\bar{x}) + \theta}{\sigma(\bar{x})\sqrt{3} + \theta} \cdot \sqrt{\frac{\theta^2}{3} + \sigma^2(\bar{x})} \quad (8.3)$$

где  $t$  - коэффициент Стьюдента.

Результат измерения будет определяться выражением

$$A = \bar{x} \pm \lambda \quad (8.4)$$

Для обоснованного принятия решения по результатам статистической обработки многократных отсчетов результат измерения должен включать в себя следующие сведения:

- усредненное значение многократных отсчетов,
- оценку рассеивания этого значения в виде среднеквадратического отклонения, или квантильного значения, или границы погрешности результата измерения с учетом как случайной, так и неисключенной систематической составляющей погрешности.

Таким образом, при использовании алгоритмов статистической обработки многократных отсчетов метрологическое исследование объекта измерения предусматривает следующие цели:

- обоснование необходимости применения алгоритма статистической обработки;
- выявление законов распределения погрешностей измерения;
- обоснование необходимого количества отсчетов;
- предложения по процедуре отбрасывания промахов;
- выявление систематических погрешностей измерения с предложением процедуры по их исключению.

### 8.3. Расчет обобщенных показателей.

При эксплуатации сложных технических систем, к которым относится и энергетическая установка корабля, большое значение приобретают обобщенные показатели. Они позволяют в сжатом виде отобразить всю информацию о процессах, происходящих в технических средствах установки. Если обобщенный показатель известен, то непосредственно его расчет, как правило, не вызывает затруднений. Однако метрологические аспекты оценки показателя нуждаются в тщательном анализе погрешности расчетов. Прежде всего, это связано с оценкой погрешности косвенного измерения и с отсутствием нормативных документов по ее нормированию.

Для оценки погрешности косвенного измерения (см. п. 3.2) необходимо:

- произвести анализ формулы для расчета обобщенного показателя;
- вывести выражение для расчета погрешности косвенного измерения;
- определить области изменения значений непосредственно измеряемых параметров и выявить их наиболее неблагоприятные сочетания;
- произвести суммирование погрешностей непосредственного измерения параметров с учетом их вклада.

Погрешность косвенного измерения может быть выражена в абсолютной и в относительной форме. Знание численного значения абсолютной погрешности необходимо для оценки степени доверия к рассчитанному обобщенному показателю. Знание численного значения относительной погрешности необходимо для сравнения точности оценки различных показателей, а также для формирования требований к метрологическому обеспечению, в которых должны отражаться, в том числе и требования к точности обобщенных показателей.

Обобщенные показатели характеризуют качество функционирования объекта измерения или оценку его технического

состояния в целом. Они выявляются в ходе метрологического исследования объекта эксплуатации как объекта контроля. Как правило, показатели имеют простые выражения для расчета. Их можно привести к ряду простейших формул, для которых хорошо известны правила расчета погрешности косвенного измерения. Они представляют собой сумму или произведение непосредственно измеряемых величин.

Для функций вида

$$y = k_1x_1 + k_2x_2 + \dots + k_mx_m \quad (8.5)$$

частные производные равны соответствующим коэффициентам при переменных. Поэтому абсолютная погрешность косвенного измерения этого показателя равна сумме погрешностей непосредственного измерения величин с учетом их вклада в обобщенный показатель

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m k_i^2 \Delta x_i^2} \quad (8.6)$$

Относительная погрешность находится соответствующим перерасчетом

$$\delta y = \frac{\Delta y}{\sum_{i=1}^m k_i x_i} 100\% \quad (8.7)$$

Из формулы (8.7) видно, что относительная погрешность имеет более сложный характер изменения в зависимости от составляющих погрешностей. Ее значение зависит от сочетания значений самих измеренных величин  $x_1, x_2, \dots, x_m$ .

Для функций вида

$$y = x_1^{k_1} x_2^{k_2} x_m^{k_m} \quad (8.8)$$

наоборот, относительная погрешность косвенного измерения очень просто выражается через относительные погрешности непосредственного измерения.

$$\delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m k_i^2 \delta x_i^2} \quad (8.9)$$

Но абсолютная погрешность в этом случае зависит не только от относительных погрешностей непосредственного измерения, но и от сочетаний значений измеряемых величин.

$$\Delta y = y \cdot \delta y / 100 = x^{k_1} x^{k_2} x^{k_m} \sqrt{\sum_{i=1}^m k_i^2 \delta x_i^2} / 100 \quad (8.10)$$

Приведенные правила определения погрешностей результата косвенного измерения распространяются не только на сумму и произведение измеряемых величин, но и на их разность и отношение. Формулы можно применять без учета знака перед аргументами, если погрешности не являются жестко коррелированными.

При более сложных выражениях для обобщенных показателей для нахождения частных производных можно воспользоваться методом малых отклонений [51].

После вывода выражений для расчета погрешности косвенного измерения необходимо произвести их анализ. Из выражений (8.6) и (8.10) следует, что на значение погрешности оказывают влияние, во-первых, сами значения непосредственно измеряемых величин, во-вторых, соотношения между этими значениями. Указанные особенности расчета погрешности косвенного измерения приводят к серьезным проблемам.

Одна из них заключается в том, что погрешности косвенного измерения могут принимать очень большие значения. Это происходит в тех случаях, когда при ее расчете возникает необходимость деления на измеренную величину. При достаточно малых измеренных значениях погрешность косвенного измерения может принимать очень большие значения, достигающие сотни и даже тысячи процентов. Очевидно, что обобщенный показатель, имеющий такую погрешность, не может использоваться для принятия ответственного решения.

Другая проблема вызвана отсутствием однозначности в результатах расчета. Получая от ИИС уже готовые результаты расчета обобщенного показателя, неизвестно от какого сочетания исходных данных получены эти результаты. Одно и тоже

значение обобщенного показателя может быть получено при самых различных сочетаниях между собой значений непосредственно измеряемых величин. В то же время погрешности косвенного измерения в этих случаях будут совершенно разными. Отсюда следует, что результаты косвенных измерений, выполняемых в ИИС, не могут быть заранее нормированы.

Указанные проблемы могут вызвать недоверие к использованию обобщенных показателей для принятия решений в условиях эксплуатации. Однако при огромном числе контролируемых параметров, которое человек не способен во время воспринять и переработать, сжатие информации путем ее обобщения является необходимым способом обеспечения оператора требуемой информацией. Поэтому для грамотного метрологического обеспечения расчетов обобщенных показателей при разработке соответствующих алгоритмов следует выявить неблагоприятные области изменений непосредственно измеряемых параметров для выявления ситуаций, когда такие проблемы могут возникнуть. Результаты измерений, проводимых в этих областях, должны исключаться из рассмотрения как недостоверные. При необходимости для этих областей следует начать поиск других обобщенных показателей.

Еще более сложные проблемы возникают при обработке многократных отсчетов косвенных измерений. Дело в том, что даже при суммировании случайных величин необходимо учитывать деформацию закона распределения суммы из-за образования композиции их распределений. При расчете погрешностей косвенного измерения необходимо учитывать более сложные деформации законов распределения при перемножении и делении случайных величин. Погрешности результатов косвенного измерения могут быть распределены по таким законам распределения вероятностей, которые не рассматриваются в справочниках по теории вероятности.

Исследования показали [18], что расчет усредненного значения результата косвенного измерения более эффективно производить, используя медиану, а оценку ширины распределения – используя доверительные значения погрешности. Если законы распределения погрешностей прямого измерения неиз-

вестны, то для оценки погрешности косвенного измерения необходимо пользоваться формулами (3.15) и (3.16), используя паспортные данные приборов, используемых для непосредственного измерения.

Рассмотренные выше проблемы являются причиной того, что погрешности результатов косвенного измерения не могут быть заранее нормированы. Поэтому в ИИС должны нормироваться лишь погрешности их измерительных каналов, выполняющих прямые измерения.

“Аттестация” результатов косвенного измерения должна производиться всякий раз при измерении путем индивидуального расчета погрешности результата каждого косвенного измерения с помощью ПЭВМ, входящей в состав ИИС. На экран дисплея одновременно с самим результатом косвенного измерения должна выводиться и его погрешность. Причем решение о доверии к результатам косвенного измерения должен принимать сам оператор по величине погрешности косвенного измерения.

Практическое выполнение этого требования осложняется тем, что дополнительная программа вычисления погрешности косвенного измерения существенно сложнее, чем программа для расчета самого обобщенного показателя. Однако выигрыш от этого дополнения очень существенный. Он состоит в обеспечении оператора обобщенной информацией, в указании интервала неопределенности в этой информации, в возможности автоматической отбраковки получаемых результатов по их погрешности, в запрете вывода результатов, погрешность которых выше некоторого предела.

*Пример 1 Экономическая эффективность похода корабля может быть обобщенным показателем в виде стоимости топлива, израсходованного на корабле за время похода. Топливо использовалось для работы главного двигателя, дизель-генераторов и вспомогательного котла.*

$$C = c_d x_{ГД} + c_{дГ} x_{дГ} + c_M x_M$$

где  $c_d, c_M$  – коэффициенты, учитывающие стоимость соответственно дизельного топлива и мазута,

$X_{ГД}$ ,  $X_{ДГ}$ ,  $X_{М}$  – количество израсходованного соответственно главным двигателем, дизель-генератором и котлом. Необходимо оценить погрешность косвенного измерения этого показателя.

Абсолютную погрешность оценки стоимости израсходованного топлива можно определить, если известны погрешности соответствующих приборов для измерения расходов

$$\Delta C = \sqrt{(c_{ДГ} X_{ДГ})^2 \Delta_{ДГ}^2 + (c_{ГД} X_{ГД})^2 \Delta_{ГД}^2 + (c_{М} X_{М})^2 \Delta_{М}^2}$$

Расчет абсолютной погрешности необходим для оценки возможного перерасхода средств на закупку топлива. При известной погрешности  $\Delta C$  можно рассчитать гарантированную сумму денежных средств  $C_{гар}$ , необходимых на закупку топлива.

$$C_{гар} = C_{расч} + 3\Delta C$$

где  $C_{расч}$  – стоимость топлива, израсходованного на расчетную дальность плавания.

Разность между фактическим расходом денежных средств и гарантированной суммой указывает на недостаточную эффективность эксплуатации энергетической установки.

Относительная погрешность оценки равна

$$\delta C = \frac{\Delta C}{C} 100\%$$

Относительная погрешность этого обобщенного показателя необходима для формирования требования к метрологическому обеспечению, исходя из которого, можно определить требуемую точность измерения непосредственно измеряемых параметров (см. п. 3.).

Пусть в соответствии с заданием на проектирование выставлено требование к точности оценки экономической эффективности равное  $\delta C_{тр}$  %. Тогда

$$\Delta C_{тр} = \frac{C_{расч} \cdot \delta C_{тр}}{100}$$



Из анализа выражения для расчета абсолютной погрешности  $\Delta C$  следует, что основной вклад в нее вносит погрешность измерения расхода топлива на главный двигатель. Это допущение позволяет обосновать требуемую точность расходомера главного двигателя

$$\Delta_{гд} = \frac{(C_{расч} \cdot \delta C_{тр})}{100}$$

Пример 2. Обобщенным показателем оценки технического состояния теплообменного аппарата является интегральный критерий  $q$  [17]. Он указывает на запас охлаждающей способности теплообменных аппаратов в замкнутых системах (см. рис. 8.1) и характеризуется отношением разности температур среды на входе и выходе двигателя и разности температур на выходе и входе охладителя. Для него установлено допустимое значение, равное 0,7. Найдем погрешность косвенного измерения этого показателя.

Выражение для расчета абсолютной погрешности косвенного измерения показателя находится из следующих простых соотношений: относительная погрешность косвенного измерения дроби равна сумме относительных погрешностей числителя и знаменателя, а абсолютная погрешность разности равна сумме абсолютных погрешностей вычитаемых членов. (Для упрощения вывода выражения предположим, что погрешности жестко не коррелированы).

$$\Delta q = \frac{1}{t_3 - t_4} (\Delta t_1 + \Delta t_2) + \frac{t_1 - t_2}{(t_3 - t_4)^2} (\Delta t_3 + \Delta t_4)$$

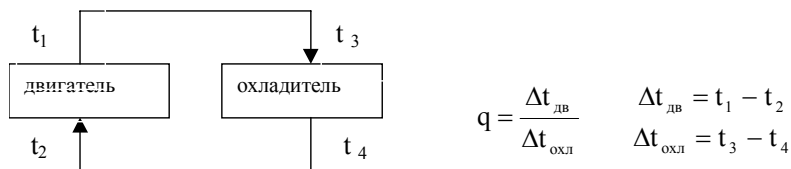


Рис. 8.1. Интегральный критерий теплообменного аппарата

Предположим, что абсолютная погрешность измерения температуры равна  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ . Для анализа значений погрешности косвенного измерения используем полученное выражение. При  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$  формула для абсолютной погрешности косвенного измерения примет вид

$$\Delta q = \frac{2}{\Delta t_{\text{охл}}} + \frac{2q}{\Delta t_{\text{охл}}}$$

Относительная погрешность равна

$$\delta q = \frac{\Delta q}{q}$$

Область изменения погрешности косвенного измерения представлена на рис.8.2. Анализ возможной точности измерения обобщенного показателя показывает, что абсолютная погрешность изменяется в пределах от 0,2 до 0,8. Учитывая, что максимальное значение показателя не должно превышать 0,7, в относительном виде это составляет  $(30 \div 120)\%$  от значения самого показателя в зависимости от условий эксплуатации. Ясно, что в большинстве случаев (в

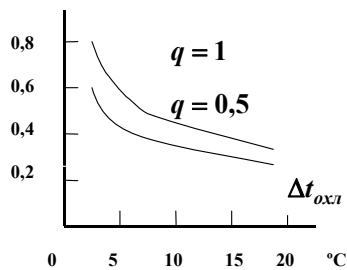


Рис. 8.2. Область изменения показателя

*тропических условиях, при загрязнениях теплообменного аппарата и в др.) применение этого показателя без оценки его погрешности может привести к принятию неправильного решения.*

## **8.4. Прогнозирование характеристик энергетической установки.**

### **8.4.1. Повышение достоверности прогнозирования.**

При выработке управляющих воздействий в процессе эксплуатации энергетической установки главным и определяющим действием является анализ тех сведений, которые поступают к обслуживающему персоналу. Совершенствование методов анализа информации является существенным резервом улучшения качества эксплуатации для энергетических установок кораблей.

Одним из эффективных методов анализа информации, которому большое внимание уделяется в научно-технической литературе, является прогнозирование [67, 68, 69]. Его обычно проводят в том случае, когда исследуемый процесс может развиваться в различных направлениях, а показатели, характеризующие его, принимают множество значений, зависящих от случайных воздействий. Эффективность прогнозирования заключается в том, что с его помощью можно без вскрытия технических средств определить, насколько близко в процессе эксплуатации или в аварийных ситуациях те или иные параметры подходят близко к своим предельным значениям или даже превосходят их. Такая оценка необходима для определения времени, требуемого для предотвращения нежелательного события.

В теории прогнозирования приняты два основных допущения:

– развитие событий может быть с достаточным основанием охарактеризовано плавной траекторией,

– общие условия, определяющие тенденцию развития в прошлом, не претерпят существенных изменений в будущем.

Принятие этих допущений позволяет осуществить предвидение дальнейшего развития событий.

В общем плане, процесс прогнозирования можно условно разделить на четыре этапа, в ходе которых выполняются следующие операции [69]:

– выявляется круг параметров, характеризующих анализируемый процесс,

– осуществляется сбор исходных данных в интервале наблюдения, на основе которых составляется динамический ряд,

– производится обработка полученных данных статистическими методами,

– рассчитываются значения параметров в точке прогноза.

По вопросам прогнозирования в целом и для конкретных этапов имеется достаточное количество научно-технической литературы для практической реализации. Но метрологическому обеспечению процессов прогнозирования уделяется недостаточное внимание.

Применение методов прогнозирования ограничивается его недостаточной методической достоверностью (см. п. 9.2). Существует устоявшееся мнение, что совпадение фактических данных и прогностических оценок явление маловероятное из-за возможного появления большой погрешности прогноза. Основными причинами возникновения погрешности являются следующие.

1. Выбор формы кривой, характеризующей тренд, содержит элемент субъективизма, главным образом, из-за отсутствия уверенности в правильности выбора тенденции развития события.

2. Оценивание параметров кривых производится на основе ограниченной совокупности наблюдений, каждое из которых содержит случайную компоненту. В силу этого параметрам кривой, а, следовательно, и ее положению в пространстве свойственна некоторая неопределенность.

3. Оценивание средних значений прогнозируемой характеристики производится на основе прошедших событий. Естественно ожидать, что в будущем эти ошибки возрастут.

При всех прочих равных условиях ошибка в определении тенденции оказывается во много раз более значимой по своим последствиям, чем ошибка, связанная со статистическим оцениванием параметров. В этом состоит основная причина появления большой методической погрешности при прогнозировании. Именно эта ошибка снижает степень доверия к прогнозированию в наибольшей степени.

В этом отношении характеристики корабельных технических средств и корабля в целом обладают явными преимуществами перед случайно развивающимися событиями ввиду преобладающей детерминированности процессов, происходящих в них. Поэтому прогнозирование характеристик, тенденция изменения которых известна из теоретических предпосылок или из опыта эксплуатации, обладает значительно меньшей погрешностью прогноза и большей достоверностью. Для важнейших характеристик объекта измерения, изменение которых ведет к катастрофе, необходимо проведение специальных метрологических исследований, обеспечивающих точность и достоверность прогноза.

Основная задача метрологических исследований сводится к тому, чтобы заранее на этапе исследовательского проектирования установить характер изменения значений параметров (динамического ряда), характеризующих прогнозируемый процесс и установить тип кривой, описывающий его. Форма кривой должна соответствовать характеру изменения динамического ряда, состоящего из значений параметров этого процесса.

Проблема выбора формы кривой является основной проблемой, которую необходимо решать при аппроксимации динамического ряда, на основе которого рассчитывается прогнозируемая характеристика. Очевидно, что самым обоснованным подходом к выдвижению гипотезы о форме кривой является анализ исследуемого процесса по существу путем изучения происходящих в нем физических явлений, с учетом специфики и взаимосвязи с другими процессами и с окружающей средой.

Для проверки гипотезы целесообразно использовать опыт эксплуатации и боевого использования корабля, где происходили события с ситуациями, аналогичными прогнозируемым событиям. Критерием для оценки адекватности кривой может служить сумма квадратов отклонений фактических значений динамического ряда от расчетных значений, полученных в соответствии с выбранной формой кривой.

Предварительный выбор формы кривой на этапе исследовательского проектирования позволяет ввести ее в алгоритм прогнозирования как гипотезу о возможной тенденции развития событий. В случае подтверждения гипотезы при прогнозировании результат будет получен с большей точностью.

Для подтверждения правильности выбора формы кривой необходимо предусмотреть в алгоритме специальные процедуры. Они предусматривают выполнение определенных правил проверки соответствия каждой функции, описывающей кривую, динамическому ряду прогнозируемой характеристики. Эти процедуры направлены на повышение достоверности прогнозирования.

Для целей алгоритмизации процедуры, подтверждающей выбранную гипотезу, рассмотрим метод характеристик прироста [69], обладающий наиболее простой совокупностью правил. В этом методе в основу исследования динамического ряда положен анализ средних приростов значений прогнозируемых характеристик во времени. Из совокупности функций, подобранных для описания динамического ряда, выбирается та, которая отвечает некоторому показателю, учитывающему характер прироста.

Для аппроксимации динамических рядов применяются относительно простые функции, такие как полиномы, различного рода экспоненты и логистические кривые. В таблице 8.1 приведены типовые функции, которые можно использовать для прогнозирования. Они практически перекрывают всевозможные варианты развития прогнозируемых событий с достаточной для практики точностью.

Таблица 8.1.

№	Название функции	Вид функции
1.	Линейная зависимость	$y = at + b$
2.	Парабола	$y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$
3.	Логарифмическая парабола	$\log y = \log a + t \log b + t^2 \log c$
4.	Простая экспонента	$y = ab^t$
5.	Модифицированная экспонента	$y = k + ab^t$
6.	Кривая Гомперца	$y = ka^{b^t}$
7.	Логистическая кривая	$\frac{1}{y} = k + ab^t$

Следуя методу характеристик прироста, для подтверждения правильности выбора формы кривой рекомендуется исчислять первые, вторые и т.д. разности уровней ряда, т.е.

$$\begin{aligned}
 u_t &= y_t - y_{t-1} \\
 u_t^{(2)} &= u_t - u_{t-1} \\
 u_t^{(3)} &= u_t^{(2)} - u_{t-1}^{(2)}
 \end{aligned}
 \quad (8.11)$$

Далее из полученных разностей рассчитываются показатели, с помощью которых определяется форма прогнозируемой кривой. Показатели могут иметь вид

$$u_t, \quad u_t^{(2)}, \quad \frac{u_t}{y_t}, \quad \log u_t, \quad \log \frac{u_t}{y_t}, \quad \log \frac{u_t}{y_t^{(2)}}
 \quad (8.12)$$

Характер изменения этих показателей служит критерием для выбора формы кривой. В таблице 8.2 приведены условия, при которых каждой из приведенных в таблице 8.1 функций соответствует характер изменения показателя. Выполнение условия для какого-либо показателя (8.12) означает, что соответствующая ему кривая (функция) наилучшим образом подходит для выравнивания динамического ряда.

Таблица 8.2

Показатель	Характер изменения показателя во времени	Вид кривой
$u_t$	Примерно одинаковые	Прямая
$u_t$	Линейно изменяются	Парабола
$\frac{u_t}{y_t}$	Примерно одинаковые	Экспонента
$\frac{u_t}{y_t}$	Линейно изменяются	Логарифмическая парабола
$\log u_t$	Линейно изменяются	Модифицированная экспонента
$\log \frac{u_t}{y_t}$	Линейно изменяются	Кривая Гомперца
$\log \frac{u_t}{y_t^2}$	Линейно изменяются	Логистическая кривая

При использовании метода целесообразно рассчитывать средние характеристики прироста по 3÷7 наблюдениям. Для этого процедура прогнозирования должна включать в себя предварительную статистическую обработку ряда, состоящую из следующих этапов:

- сглаживание динамического ряда по скользящей средней;
- определение средних приростов для каждого интервала наблюдения;
- расчет показателей прироста, указанных в таблице 8.2, для каждого интервала наблюдения;
- определение вида кривой по характеру изменения показателя во времени (таблица 8.2);
- заключение о подтверждении вида кривой, принятой в процессе исследовательского проектирования.



#### 8.4.2. Доверительные интервалы прогноза.

При известном тренде развития событий процесс прогнозирования заключается в подстановке соответствующего значения времени прогноза в формулу, описывающую тренд. В этом случае получается точечный прогноз. Подобная оценка прогнозируемой величины является явно недостаточной. Очевидно, что точное совпадение фактических данных и прогнозируемых точечных оценок, полученных путем экстраполяции кривых, характеризующих тенденцию, явление маловероятное. Необходима интервальная оценка для того, чтобы прогноз, охватывая некоторый интервал значений прогнозируемой переменной, был более надежным, т.е. интервал должен иметь определенную доверительную вероятность. Поэтому второй важной задачей метрологического обеспечения, обеспечивающего прогнозирование, является получение интервальной оценки прогноза с заданной вероятностью.

Из трех причин возникновения погрешностей прогнозирования, рассмотренных выше, с надежностью связаны последние две. Для оценки погрешности, связанной с неопределенностью оценки коэффициентов кривой, необходимо учитывать степень разброса наблюдаемых значений измеряемых параметров. Чем больше этот разброс, тем менее определены коэффициенты кривой и, следовательно, тем шире должен быть интервал прогноза при одной и той же его заданной вероятности. Другая погрешность вызвана тем, что найденные коэффициенты справедливы только в пределах периода, охваченного наблюдением, причем с некоторой степенью неопределенности. Следует ожидать, что погрешность прогноза будет расти с увеличением периода упреждения.

Для нахождения доверительного интервала прогноза рассмотрим способы расчета обеих погрешностей. Первая из них определяет доверительный интервал тренда, а вторая – доверительный интервал прогноза.

Для расчета доверительного интервала тренда используют оценку степени разброса измеренных значений параметров.

Обычно ее определяют в виде среднеквадратического отклонения фактических наблюдений от расчетных значений, полученных от выравнивания динамического ряда. В общем случае среднеквадратическое отклонение от тренда находится с помощью выражения [69]

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{f}} \quad (8.13)$$

где  $y_t, \hat{y}_t$  - соответственно фактическое и расчетное значения членов динамического ряда;  $f$  - число степеней свободы,  $f = n - m'$ , где  $m'$  - число оцениваемых коэффициентов;  $n$  - число наблюдений. Так, если выравнивание производится по прямой, то  $f = n - 2$ , для параболы второй степени  $f = n - 3$  и т.д.

Помимо правильной обработки результатов измерения значение среднеквадратического отклонения от тренда зависит от правильной организации и планирования измерений на участке наблюдения. Использование методов планирования эксперимента позволяет определить минимально необходимое число точек наблюдения и их взаимное расположение. Выполнение этих рекомендаций позволяет значительно уменьшить значение среднеквадратического отклонения.

Выражение (8.13) является основой для определения доверительного интервала тренда. Он находится с помощью известного выражения [22] с использованием коэффициента Стьюдента

$$\varepsilon_y = \pm t_{\alpha} s_y \quad (8.14)$$

Доверительный интервал определяет ширину полосы, в центре которой находится кривая, характеризующая прогнозируемый процесс при заданной доверительной вероятности. Отсюда размер интервала зависит не только от среднеквадратического отклонения от тренда, но и от заданной доверительной вероятности.

В отличие от доверительного интервала тренда доверительный интервал прогноза должен учитывать возможность

отклонения от этого тренда с течением времени. Обозначим среднеквадратическую ошибку прогноза как  $s_p$ . Она равна

$$s_p = k_p s_y \quad (8.15)$$

где  $k_p$  – коэффициент дисперсии предсказания.

Доверительный интервал прогноза по аналогии с выражением (8.14) будет равен

$$\Delta_p = \pm t_\alpha k_p s_y \quad (8.16)$$

Из выражения (8.16) следует, что для определения интервала прогноза необходимо дополнительно найти коэффициент дисперсии предсказания. Рассмотрим физический смысл и способ нахождения коэффициента дисперсии предсказания. Для простоты рассмотрения возьмем линейный тренд.

Пусть нам необходимо описать в виде некоторой функции взаимосвязь двух переменных величин  $y$  и  $x$ , между которыми предполагается линейная зависимость:

$$y = a + bx \quad (8.17)$$

Практически между этими величинами обычно существует не столь жесткая зависимость, т.к. отдельные наблюдения  $y$  и  $x$  в большей или меньшей степени могут отклоняться от линейной зависимости в силу воздействия различных неучтенных факторов и случайных событий. Учитывая это уравнение взаимосвязи двух переменных можно представить в виде

$$y = a + bx + \varepsilon \quad (8.18)$$

где  $\varepsilon$  –случайная переменная, характеризующая отклонение от теоретической линии.

Таким образом, в уравнении (8.18) значение  $y$  представляется как сумма двух частей – систематической ( $a + bx$ ) составляющей и случайной ( $\varepsilon$ ) составляющей. Уравнение (8.17) характеризует некоторое среднее значение  $y$  для данного значения  $x$ , а уравнение (8.18) показывает индивидуальное значение  $y$  с учетом возможных случайных отклонений от средних значений. Для целей прогнозирования интерес представля-

ет нахождение именно индивидуального прогноза значения  $y$  в заданный момент времени.

Для прогнозируемого значения  $y$  среднеквадратическое отклонение  $s_p$  складывается из трех составляющих [69]:

- среднеквадратического отклонения от тренда  $s_y$
- среднеквадратического отклонения коэффициента

$$a: s_a = \frac{s_y}{n}$$

- среднеквадратического отклонения параметра  $b$ :

$$s_b = \frac{(\bar{x} - x_p)^2}{\sum (\bar{x} - x_i)^2} \cdot s_y$$

Здесь:  $x_i$  - значение независимой переменной  $x$  в  $i$ -тый момент времени,  $\bar{x}$  - среднее значение независимой переменной,  $x_p$  - значение независимой переменной в прогнозируемый момент времени.

Суммируя все три составляющие, получим среднеквадратическое отклонение прогноза:

$$s_p = s_y \left[ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x} - x_p)^2}{\sum (\bar{x} - x_i)^2} \right] \quad (8.19)$$

Из сравнения выражений (8.15) и (8.19) следует, что коэффициент дисперсии предсказания равен выражению в скобках.

$$k_p = \left[ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x} - x_p)^2}{\sum (\bar{x} - x_i)^2} \right] \quad (8.20)$$

Из выражения (8.20) следует, что дисперсия предсказания становится меньше с увеличением числа измерений  $n$  и с уменьшением расстояния от момента предсказания до среднего значения независимой переменной  $(\bar{x} - x_p)$ . Указанные факторы полностью соответствуют интуитивным представлениям.

Таким образом, доверительный интервал прогноза зависит от следующих факторов:

- от числа произведенных измерений,
- от соотношения периода наблюдения и периода упреждения,
- от заданного значения доверительной вероятности.

Два первых фактора определяют точность прогноза, а третий – его надежность. Метрологическое обеспечение алгоритма прогнозирования должно учитывать эти обстоятельства.

#### **8.4.3. Способы определения коэффициента дисперсии предсказания.**

Определение значения коэффициента дисперсии предсказания является главной задачей метрологического обеспечения прогноза. Он оказывает решающее влияние на результаты прогнозирования главным образом через дисперсии коэффициентов принятой формы кривой прогнозирования. Чем сложнее математическая модель прогнозируемого явления, тем большее количество содержит она неизвестных коэффициентов, подлежащих идентификации. Из этого следует, что количество слагаемых в выражении (8.9) увеличится с ростом сложности модели, а значение коэффициента дисперсии предсказания резко возрастет.

На рис. 8.3 и 8.4 показано, во сколько раз увеличивается доверительный интервал ( $\kappa$ ) для линейной (1) и квадратичной (2) математической модели в зависимости от соотношения интервала прогнозирования ( $L_{\Pi}$ ) и ( $L_{\text{H}}$ ) и от количества точек наблюдения. Из рисунка 8.3 следует, что для квадратичной формы кривой увеличение значительно больше, чем для линейной кривой. Оно возрастает с увеличением интервала прогноза и с уменьшением числа измерений. При количестве точек измерения больше 15 коэффициент практически имеет линейную зависимость от их числа  $n$ .

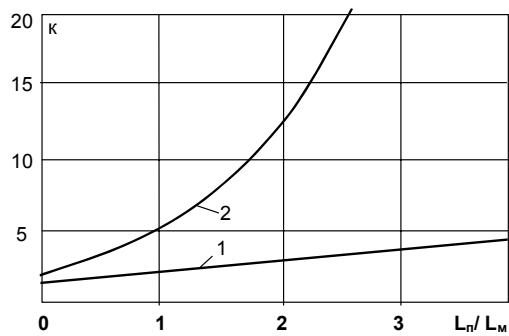


Рис. 8.3. Рост доверительного интервала от соотношения интервала прогноза к интервалу наблюдения

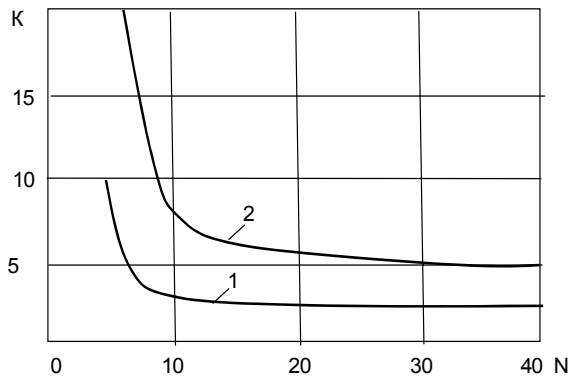


Рис. 8.4 Уменьшение доверительного интервала с увеличением точек наблюдения

При  $N=20$  и равенстве интервала прогноза и интервала наблюдения ( $L_{\text{п}}/L_{\text{н}}=1$ ) для линейной формы кривой доверительный интервал прогноза увеличивается в 2,5 раза, а для квадратичной кривой – в 5 раз. Для более сложных функций увеличение еще больше и, например, при тех же условиях ошибка прогноза увеличивается более чем в 25 раз для кубической формы кривой. Ясно, что для практических целей подобный прогноз не несет никакой информации.

С точки зрения метрологического обеспечения прогнозирование целесообразно осуществлять для таких физических

процессов, математическая модель которых приводится к линейному или параболическому виду, но при небольшом ( $L_{\text{п}}/L_{\text{н}} < 0.5$ ) интервале упреждения. К подобным процессам относятся, в том числе и такие, для которых можно использовать модели, приведенные в таблице 8.1. Путем логарифмирования их можно привести к линейному виду заменой переменных. В таблице 8.3 приведены функции, которые можно использовать для прогнозирования без особого ущерба для метрологического обеспечения.

При разработке алгоритмов для функций, рекомендуемых для использования, оценку коэффициента дисперсии предсказания можно производить непосредственно по формулам, например, по формуле (8.20). В литературе [69] имеются таблицы, по которым можно определить его значение в зависимости от числа измерений и соотношения интервалов наблюдения и прогнозирования. Таблицы составлены для различных значений коэффициента Стьюдента с целью присвоения результату прогнозирования определенной степени надежности.

Планирование эксперимента позволяет уменьшить значение коэффициента дисперсии предсказания и тем самым повысить точность прогноза [72, 73]. План проведения измерений задается координатами каждой точки и частотой измерения в каждой из них. Координаты точек определяются исходя из необходимого минимума. Для линейной модели необходимо проводить измерения в двух точках: в начале и в конце интервала наблюдения. Для параболы – три точки: начало середина и конец интервала наблюдения. Частота измерения в каждой точке приблизительно определяется по формулам

Для линейной модели

$$\xi_1 = \frac{t_p - 1}{2t_p} \quad \xi_2 = \frac{t_p + 1}{2t_p} \quad (8.21)$$

Таблица 8.3.

№ п.п.	Название функции	Вид функции	Преобразование переменных	Уравнение в новых переменных
1.	Простая экспонента	$y = ab^t$	$\ln y = v$ $\ln a = A$ $\ln b = B$ $t = z$	$v = Bz + A$
2.	Модифицированная экспонента	$y = k + ab^t$	$\ln(y - k) = v$ $\ln a = A$ $\ln b = B$ $t = z$	$v = Bz + A$
3.	Кривая Гомперца	$y = ka^b t$	$\ln y = v$ $\ln a^b = A$ $\ln k = K$ $t = z$	$v = Az + K$
4.	Логистическая кривая	$\frac{1}{y} = k + ab^t$	$\ln\left(\frac{1}{y} - k\right) = v$ $\ln a = A$ $\ln b = B$ $t = z$	$v = Bz + A$
5.	Логарифмическая функция	$y = b \ln t + a$	$y = v$ $\ln t = z$	$v = bz + a$
6.	Дробная функция	$y = \frac{1}{at + b}$	$t = z$ $\frac{1}{y} = v$	$v = az + b$
7.	Дробно-линейная функция	$y = \frac{t}{at + b}$	$\frac{1}{t} = z$ $\frac{1}{y} = v$	$v = a + bz$



Для параболы

$$\xi_1 = \frac{t_p^2 - t_p}{2(2t_p^2 - 1)}; \quad \xi_2 = \frac{t_p^2 - 1}{2(2t_p^2 - 1)}; \quad (8.22)$$
$$\xi_3 = \frac{t_p^2 + 1}{2(2t_p^2 - 1)};$$

Приведем расчетные формулы для коэффициентов математической модели и коэффициента дисперсии предсказания.

В соответствии с таблицей 8.1 представим математическую модель в линейном виде

$$y = at + b \quad (8.23)$$

и в виде параболы

$$y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (8.24)$$

Для упрощения работы с планом координаты точек в области наблюдения и области прогнозирования выражены в относительных единицах. За единицу принято половина интервала наблюдения. Для перевода в относительные единицы использовано выражение (8.25), в котором  $t_{\min}$  и  $t_{\max}$  - это время начала и окончания интервала наблюдения.

$$\bar{t} = \frac{t - \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}}{\frac{t_{\max} - t_{\min}}{2}} \quad (8.25)$$

Тогда в относительных единицах начальная точка интервала наблюдения равна  $-1$  при  $t=0$ , а конечная точка интервала наблюдения равна  $+1$  при  $t=t_{\max}$ . Для линейной модели достаточно проводить измерения в двух точках  $\bar{t} = -1$  и  $\bar{t} = +1$ . Для параболы необходимо использовать три точки, добавив еще половину интервала наблюдения, т.е.  $\bar{t} = 0$ . Координаты точек прогноза определяются таким же путем. Например, если интервал прогноза равен половине интервала наблюдения, т.е.  $t_p = 1,5t_{\max}$ , то относительное время равно  $\bar{t}_p = 2$ .

Здесь возможны два случая:

1. Значение прогнозируемой величины в начале интервала наблюдения равно нулю.

На рис. 8.5 приведена графическая иллюстрация назначения интервала наблюдения при разработке алгоритма прогнозирования с использованием линейной модели и параболы. Для линейной модели в этом случае план проведения измерений очень простой: измерения проводятся только во второй точке. Коэффициенты модели равны половине среднего значения прогнозируемой величины, измеренной в этой точке

$$a = b = 0,5\bar{y}$$

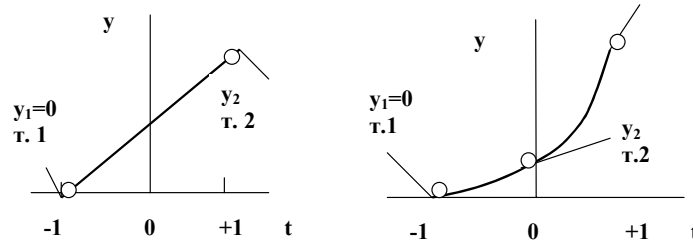


Рис. 8.5. Графическая иллюстрация интервала наблюдения для случая, когда  $y_1=0$

Коэффициент дисперсии предсказания находится по формуле

$$k_p = \sqrt{\frac{\bar{t}(\bar{t}+1)}{4}} \quad (8.26)$$

Например, если интервал прогноза равен половине интервала наблюдения ( $\bar{t}_p = 2$ ), то  $k_p = 1,22$ .

Для параболы измерения проводятся в двух точках. Поэтому для составления плана необходимо определить частоту измерения в этих точках. Она определяется по формулам

(8.22). Если  $\bar{t}_p = 2$ , то частоты равны  $\xi_2 = \frac{1}{3}$ ,  $\xi_3 = \frac{2}{3}$ . Как следует из графика на рис. 8.4 количество измерений должно быть не менее 15. Пусть  $N = 18$ , тогда во второй точке необходимо

произвести 6 измерений, а в точке в третьей точке – 9 измерений.

Коэффициенты математической модели определяются по формулам

$$a_0 = \bar{y}_2, \quad a_1 = 0,5\bar{y}_3, \quad a_3 = 0,5\bar{y}_3 - \bar{y}_2$$

Коэффициент дисперсии предсказания равен

$$k_p = \sqrt{\frac{(2t_p^2 - 1)(3t_p^2 + t_p - 2)}{6}} \quad (8.27)$$

Например, если интервал прогноза равен половине интервала наблюдения ( $\bar{t}_p = 2$ ), то  $k_p = 3.74$ . Как показывают расчеты при квадратичной форме кривой точность прогноза для данного соотношения интервалов наблюдения и прогноза значительно уменьшается.

2. Значение прогнозируемой величины в начале интервала наблюдения не равно нулю.

На рис. 8.6 приведена графическая иллюстрация назначения интервала наблюдения при разработке алгоритма прогнозирования с использованием линейной модели и параболы при  $y_1 \neq 0$ .

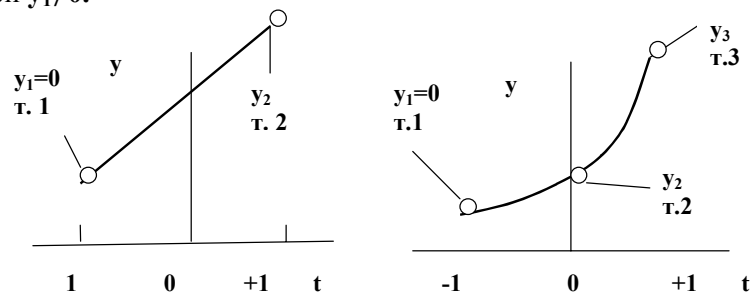


Рис. 8.6. Графическая иллюстрация интервала наблюдения для случая, когда  $y_1 \neq 0$

Для линейной модели план проведения измерений состоит в проведении измерений в двух точках с частотой, которая определяется по формулам (8.21). Если

$\bar{t}_p = 2$ , то частоты равны  $\xi_2 = 0,25$ ,  $\xi_3 = 0,75$  и при том же числе измерений 18 в первой точке необходимо произвести 5 измерений, а во второй точке – 13 измерений.

Коэффициенты модели определяются по формулам

$$a_0 = 0,5(\bar{y}_1 + \bar{y}_2) \quad a_1 = 0,5(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)$$

Коэффициент дисперсии предсказания находится по формуле

$$k_p = \sqrt{\frac{\left(\frac{t_p^2}{2} + 1\right)}{2}} \quad (8.28)$$

Например, если интервал прогноза равен половине интервала наблюдения ( $\bar{t}_p = 2$ ), то  $k_p = 1,58$ .

Для параболы измерения необходимо проводить в трех точках. Поэтому для составления плана необходимо определить частоту измерения в этих точках. Она определяется по формулам (8.22). Если  $\bar{t}_p = 2$ , то частоты равны

$$\xi_1 = \frac{3}{14}, \xi_2 = \frac{6}{14}, \xi_3 = \frac{5}{14}$$

Как следует из графика на рис.8.2 количество измерений должно быть не менее 15. Пусть  $n = 18$ , тогда в первой точке необходимо произвести приблизительно три измерения, во второй точке - 8 измерений, а в точке в третьей точке – 7 измерений. В приведенных примерах можно провести и большее количество измерений, но точность прогноза при этом увеличится незначительно.

Коэффициенты математической модели определяются по формулам

$$a_0 = \bar{y}_2, \quad a_1 = 0,5(\bar{y}_2 - y_1), \quad a_3 = 0,5(\bar{y}_3 + \bar{y}_1) - y_2 \quad (8.29)$$

Коэффициент дисперсии предсказания равен

$$k_p = \sqrt{1 + 1,5(t_p^4 - t_p^2)} \quad (8.30)$$

Например, если интервал прогноза равен половине интервала наблюдения ( $\bar{t}_p = 2$ ) то  $k_p = 4,36$ . Здесь также, как и в предыдущем случае, точность прогноза значительно снижается для данного соотношения интервалов наблюдения и прогноза.

Отсюда следует, для квадратичной формы кривой тренда целесообразно прогнозировать с меньшим упреждением или значительно повышать точность измерений.

Таким образом, использование методов теории планирования эксперимента позволяет увеличить степень доверия к результатам прогнозирования при минимальном общем количестве измерений и правильной организации процедуры измерений путем составления плана эксперимента.

*Пример. Опыт эксплуатации кораблей показал, что при сильных пожарах на подводной лодке происходит выгорание уплотнений, через которые внутрь прочного корпуса поступает вода. По мере развития аварии нарастает дифференциал, который в конечном итоге может привести к потере устойчивости. Прогнозирование развития аварии в данном случае необходимо и позволит избежать гибели людей и корабля. Известно, что в первое время нарастание дифференциала происходит линейно, а через некоторое время – по квадратичной зависимости (8.24). Рассмотрим возможности контроля аварийной ситуации путем прогнозирования увеличения дифференциала со временем.*

Пусть для измерений используются дифференциометры с предельной погрешностью  $0,3^\circ$ , и измерения производятся через один час. Для определения коэффициентов параболы необходимо произвести измерения в трех точках. Тогда через два часа измеренных данных будет достаточно для формирования интервала наблюдения. С помощью выражений (8.29) уже можно рассчитать коэффициенты параболы. Коэффициент дисперсии предсказания найдем по формуле (8.30). При минимальном числе измерений для ориентировочных расчетов коэффициент Стьюдента можно принять равным 2.0. Результаты расчетов прогнозируемого значения дифференциала, коэффициента дисперсии предсказания и доверительного интервала в точке прогноза сведены в таблицу 8.4.

В таблице приведены расчеты прогнозируемого значения дифференциала соответственно через 4, 6 и 8 часов после начала измерений. Гарантированное значение учитывает ширину доверительного интервала и означает, что с вероятностью 0,95

дифферент не превзойдет значение, указанное в таблице. Очевидно, что принятие решения о действиях личного состава следует не по точечным оценкам прогнозируемой величины, а с учетом доверительного интервала.

Таблица 8.4

Наименование величин	Результаты измерений и расчетов					
	Интервал наблюдения, (час)			Интервал прогноза, (час)		
	0	1	2	4	6	8
Значение дифферента в интервале наблюдения	1,5	2,0	4,0			
Среднее квадратическое отклонение от тренда	0,5					
Коэффициенты математической модели	$a_0=2,0, \quad a_1=0,25, \quad a_2=0,75$					
Значение дифферента в точке прогноза				15	30,5	52
Коэффициент дисперсии предсказания				10,4	30,1	187
Доверительный интервал				5,2	15,05	94
Гарантированное значение дифферента				20,2	45,15	нет

### 8.5. Экстраполяция характеристик энергетической установки.

Технические характеристики энергетического оборудования, как правило, изменяются не случайным образом, а в соответствии с некоторой детерминированной основой, которая

всегда известна исходя из физической природы рассматриваемого явления, опыта эксплуатации оборудования, экспериментальных данных, полученных при проведении специальных испытаний. Примерами характеристик с известной детерминированной основой являются буксировочная кривая, уравнения теплообмена, гидравлические потери и т.п.

Отмеченное свойство характеристик полезно использовать для анализа информации обслуживающим персоналом в процессе эксплуатации, в том числе для анализа диагностических моделей. В этом случае обработка информации может производиться методами экстраполяции. Эти методы особенно полезными являются для предотвращения аварийных ситуаций. Эффективность и необходимость экстраполяции подтверждают следующие типичные ситуации. Для выбора безопасного режима работы оборудования необходимо оценить степень его удаленности от опасного состояния. Предотвращение необратимых процессов возможно, если известен запас до предельного значения параметра. При изменении температуры окружающей среды возможен нежелательный рост отдельных характеристик оборудования. Путем проведения измерений на режимах малой нагрузки (интервал наблюдения) можно с заданной степенью достоверности оценить значения параметров при развитии полной мощности и сравнить их с уставками.

В информационно-измерительных системах для этих целей могут служить алгоритмы экстраполяции технических характеристик. Главная задача алгоритмов состоит в том, чтобы определить коэффициенты уравнения, отражающего детерминированную основу анализируемого явления, и найти значение интересующего параметра в заданной точке. Подобная постановка задачи совпадает с задачами, решаемыми при прогнозировании. Отличие заключается в том, что при прогнозировании аргументом является время, а в задачах экстраполяции аргументом может быть любая физическая величина, от значения которой зависит анализируемая характеристика.

Метрологическое исследование объекта измерения, необходимое для получения достоверной информации при экст-

раполяции технических характеристик, заключается в обосновании:

- вида экстраполируемой технической характеристики;
- интервала наблюдения и допустимых границ экстраполяции;
- выбора количества точек наблюдения и частоты измерений в них;
- точности оценки значений экстраполируемой характеристики в заданной области.

Все перечисленные вопросы решаются теми же способами, как и при прогнозировании, с некоторыми видоизменениями в формулах путем замены переменных  $t$  на  $x$ . Поэтому нет необходимости в повторном изложении способов обоснования метрологического обеспечения. Процедуру метрологического обоснования алгоритмов экстраполяции рассмотрим на конкретных примерах.

*Пример 1. Найти значение давления масла  $P$  за импеллером турбоагрегата при достижении им предельной частоты вращения  $n$ . Это значение необходимо для проверки правильности срабатывания защиты механизма. Найдем его методом экстраполяции.*

*Увеличение давления масла с ростом частоты вращения определяется математической моделью вида*

$$P = a_0 + a_1n + a_2n^2 \quad (8.31)$$

*Пределы изменения давления масла за импеллером в точке экстраполяции в соответствии с техническими условиями равны  $(8 \pm 10)\%$ .*

*Для определения неизвестных коэффициентов модели, являющейся многочленом второй степени, достаточно произвести измерения в трех точках. В качестве независимых переменных приняты нормированные отклонения частоты вращения импеллера от среднего значения*

$$v = \frac{n - \bar{n}}{1000} \quad (8.32)$$

*где  $n$  и  $\bar{n}$  — соответственно текущее и среднее значение независимой переменной.*



Измерение значений давления масла  $P$  в новых координатах произведено в трех точках  $V_k$  ( $k=1,2,3$ ) по восемь значений в каждой точке. Результаты измерений сведены в таблицу 8.5.

Таблица 8.5

$V_k$	Давление масла								Среднее значение $P_k$
	1	2	3	4	5	6	7	8	
-1	1,00	1,02	1,05	1,00	0,98	0,95	1,01	1,00	1,001
0	2,26	2,28	2,31	2,26	2,24	2,21	2,27	2,27	2,263
1	4,50	4,52	4,54	4,49	4,17	4,46	4,51	4,52	4,502

Среднее квадратическое отклонение на участке наблюдения равно  $S_y = 0,076 \text{ кг/см}^2$ , что составляет в среднем 3,8%. Коэффициенты математической модели вычислены по формулам

$$a_0 = \sum_1^3 \bar{p}_k - \sum_1^3 v_k^2 \bar{p}_k = 2,263$$

$$a_1 = \frac{1}{2} \sum_1^3 v_k \bar{p}_k = 1,7505 \quad (8.33)$$

$$a_2 = \frac{3}{2} \sum_1^3 v_k \bar{p}_k - \sum_1^3 \bar{p}_k = 0,4885$$

Математическая модель зависимости давления масла за импеллером от числа его оборотов с числовыми коэффициентами имеет вид

$$P = 2,263 + 1,7505v + 0,4885v^2 \quad (8.34)$$

В предполагаемой точке экстраполяции при  $v_p = 2$  давление масла равно  $P = 7,72 \text{ кг/см}^2$ . Коэффициент дисперсии предсказания для параболы, рассчитанный по формуле (8.30), равен 4,36. Коэффициент Стьюдента для проведенного количества измерений равен двум при доверительной вероятности  $P=0,95$ . Расчетное значение давление масла с учетом довери-

тельного интервала в соответствии с выражением (8.16) равно

$$P = 7,72 \pm 0,66 \text{ кг/см}^2$$

Расчеты показывают, что доверительный интервал составляет 8,5% от прогнозируемого значения. Он учитывает погрешность измерения, доверительную вероятность и соотношение интервала наблюдения и интервала экстраполяции. Таким образом, путем экстраполяции подтверждена возможность срабатывания защиты механизма.

*Пример 2.* Рассмотрим процедуру экстраполяции для определения максимальной скорости корабля при изменении буксировочной кривой из-за увеличения сопротивления движению корабля.

Одним из факторов, ограничивающих максимальную скорость корабля, является величина упора на главном упорном подшипнике. При буксировке, при плавании во льдах, при затоплении части отсеков корабля и в других случаях повышается сопротивление воды движению корабля, и значение упора растет. Увеличение упора допускается до тех пор, пока его значение не станет выше предела, указанного в формуляре корабля. Дальнейший рост опасен из-за возможности выхода из строя упорного подшипника. В настоящее время предельная скорость корабля определяется по паспортной диаграмме методом трех точек [70]. Метод используется инженерами-механиками, но не позволяет оценить точность расчетов и поэтому не может считаться достоверным. Для обеспечения достоверности экстраполяции алгоритм необходимо дополнить оценкой доверительного интервала.

Из теоретических соображений и опыта эксплуатации известно, что детерминированная основа зависимости скорости от частоты вращения гребного винта представляет собой квадратичную функцию.

$$v = a_1 n + a_2 n^2 \quad (8.35)$$

При экстраполяции действует гипотеза о том, что детерминированная основа не изменяется при любых условиях плавания корабля. Конкретные условия, увеличивающие со-

противление движению корабля, изменяют лишь коэффициенты уравнения (8.35). Естественно, что при  $n = 0$  скорость корабля также равна нулю. Поэтому минимальное число точек замера скорости и частоты вращения в интервале наблюдения для этой функции равно двум. Коэффициенты уравнения, отражающие конкретные условия плавания, рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2\bar{v}_1 - 0,5\bar{v}_2}{n_H} \\ a_2 &= \frac{\bar{v}_1 - 0,5\bar{v}_2}{n_H^2} \end{aligned} \quad (8.36)$$

где  $n_H$  - частота вращения, соответствующая середине интервала наблюдения,  $v_1, v_2$  - средние значения скорости при измерениях в точках 1 и 2 интервала наблюдения.

При известных значениях коэффициентов уравнение можно использовать для экстраполяции значений скорости корабля при различных значениях частоты вращения. Ограничением для развития скорости, как уже отмечалось, является упор на главный упорный подшипник. Из паспортных данных для каждого корабля это ограничение отражается линейной зависимостью вида

$$v = b_1 n - b_2 \quad (8.37)$$

где  $b_1, b_2$  - постоянные коэффициенты, известные для конкретного корабля. Совместное решение уравнений (8.35) и (8.37) позволяет получить максимально-возможные частоту вращения линии вала и скорость корабля в условиях, при которых производились измерения.

Замеры производились в двух точках при оборотах в минуту  $n_1 = 100, n_2 = 200$  по пять замеров в каждой. Коэффициенты математической модели найдены с помощью выражений (8.36). В результате совместного решения уравнений (8.35 и 8.37) найдены искомые значения экстраполируемых величин. При нормальных условиях в экстраполируемой точке частота вращения равна  $n = 313$  об/мин, а скорость –  $v = 32,8$

узл. В аварийных условиях соответственно -  $n=262$  об/мин и  $v = 21,8$  узл. В относительных единицах (см. 8.25) частота вращения равна соответственно  $v_p = 2,13$  и  $v_p = 1,62$ .

Для используемого количества измерений при доверительной вероятности 0,95 коэффициент Стьюдента равен 2,41. При расчетах доверительного интервала для оценки коэффициента дисперсии предсказания использовалось выражение (8.27). На рис. 8.7 приведена графическая иллюстрация приведенного примера. Для наглядности на графике показана точечная оценка экстраполяции.

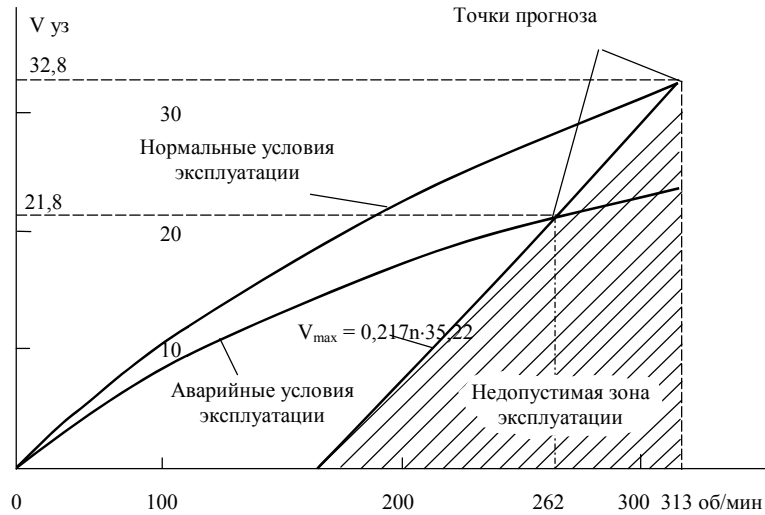


Рис. 8.7 Экстраполяция буксировочной кривой

В таблице 8.6 приведены окончательные результаты замеров и расчетов скорости движения корабля в нормальных и аварийных условиях плавания. Метрологическое обеспечение алгоритма гарантирует с вероятностью 0,95, что экстраполируемое значение частоты вращения линии вала, соответствующее нижней границе доверительного интервала макси-

мальной скорости, не приведет к превышению допустимого упора на гребном валу.

Таблица 8.6

Наименование величины	Нормальные условия эксплуатации		Аварийные условия эксплуатации	
	100 об/мин	200 об/мин	100 об/мин	200 об/мин
Среднее измеренное значение скорости в узлах	13	24,2	9,4	19,4
Среднеквадратическое отклонение	0,15	0,15	0,15	0,15
Значения коэффициентов	$a_1 = 0,8 \cdot 10^{-4}$ $a_2 = 0,13$		$a_1 = 0,3 \cdot 10^{-4}$ $a_2 = 0,091$	
	$b_1 = 0,217$		$b_2 = 35,22$	
Максимальное значение - частоты вращения - скорости	313		262	
	32,8		21,8	
Значение коэффициента дисперсии предсказания	4,56		2,56	
Величина доверительного интервала для скорости	1,6		0,9	
Значение параметров в точке экстраполяции с гарантированным запасом - скорости - частоты вращения	31,2		20,9	
	309		259	

## **9. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТА ИЗМЕРЕНИЯ.**

Совершенствование метрологического обеспечения осуществляется для повышения его эффективности. Оно может быть направлено на снижение стоимости метрологического обеспечения, на уменьшение массы или объема дополнительного оборудования, на увеличение полноты контроля, на повышение достоверности информации, получаемой при измерениях, а также на улучшение других частных показателей.

Метрологическое исследование объектов измерения, как и другие направления совершенствования метрологического обеспечения, ориентировано на повышение эффективности информационно-измерительных систем и достоверности информации, получаемой оператором. Результативность здесь может быть достигнута выбором совокупности контролируемых параметров и точности их измерения, а также расчетом предельных и допустимых значений параметров. Вполне естественно можно считать, что качество метрологического исследования оценивается достигнутым повышением эффективности метрологического обеспечения.

Рассмотрим частные критерии повышения эффективности для тех случаев, когда совершенствование метрологического обеспечения заключается в выборе оптимального способа измерения.

### **9.1. Эффективность метрологического обеспечения.**

При выборе оптимального способа измерения совершенствование метрологического обеспечения может производить-

ся либо путем увеличения точности измерения либо путем уменьшения затрат на создание информационно измерительных систем. Рассмотрим частные критерии эффективности для обоих случаев.

**Оценка степени повышения эффективности путем обеспечения максимальной точности измерения.** Следуя общим принципам оценки эффективности (см. п. 1.3.2) степень ее повышения можно принять равной относительной величине уменьшения погрешности оценки состояния

$$\Delta \Theta = 1 - \frac{\delta_{\min}}{\delta} \quad (9.1)$$

Величины  $\delta$  и  $\delta_{\min}$  находятся при одних и тех же ограничениях на ресурсы соответственно до и после оптимизации.

Используя результаты, полученные в п. 6, найдем выражения, позволяющие определить степень повышения эффективности измерения для статистически независимых погрешностей измерения параметров.

Рассмотрим ограничения на выбор параметров в виде линейного уравнения связи. Значение ресурса, ограничивающего точность измерения, определяется соотношением (6.5)

$$R = \sum_{i=1}^m a_i \delta_i \quad (9.2)$$

Погрешность оценки состояния после оптимизации при  $r_{ij} = 0$  можно найти с использованием выражения (6.12)

$$\delta_i^0 = R \frac{\frac{a_i}{G_{ii}}}{\sum_{i=1}^m \frac{a_i^2}{G_{ii}}} \quad (9.3)$$

Погрешность оценки состояния можно определить, пользуясь выражением (3.25).

После подстановки в формулу (9.1) выражения для оценки погрешности состояния (3.25) и выражений (9.2), (9.3) получим

$$\Delta\mathfrak{E} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m a_i \delta_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{a_i^2}{G_{ii}^0}} \sqrt{\sum_{i=1}^m G_{ii} \delta_i^2}} \quad (9.4)$$

Формула (9.4) позволяет определить степень повышения эффективности метрологического обеспечения при использовании методов выбора оптимального способа измерения. Повышение эффективности зависит от первоначального до оптимизации распределения погрешностей измерения параметров  $\delta_i$  и от характеристик приборов и объекта измерения, а именно: коэффициентов  $a_i$  характеризующих влияние погрешности на значение ограничивающего ресурса, и от компонент метрического тензора в старом  $G_{ii}$  и новом базисах  $G_{ii}^0$ , отражающих метрические свойства объекта измерения. По сравнению с выбором, основанным на принятии равных погрешностей измерения, использование методов выбора оптимального способа увеличивает эффективность на величину

$$\Delta\mathfrak{E} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{a_i^2}{G_{ii}^0}} \sqrt{\sum_{i=1}^m G_{ii}}} \quad (9.5)$$

Анализ выражения (9.5) показывает, что оно является функцией от  $2m$  переменных и изменяется от 0 до 1. При равенстве коэффициентов  $a_i = a_k$ , отражающих вес каждого параметра при распределении ресурса, и для объектов с метрическими свойствами, характеризующимися одинаковыми компонентами  $G_{ii} = G_{kk}$ , функция (9.6) равна нулю, т.е.  $\Delta\mathfrak{E} = 0$ . Как и



следовало ожидать, в этом случае использование обоих способов совершенствования метрологического обеспечения не способствует повышению эффективности. С увеличением разницы между компонентами метрического тензора, с одной стороны, и между весами, с другой стороны, эффект от применения оптимального способа измерения может быть получен.

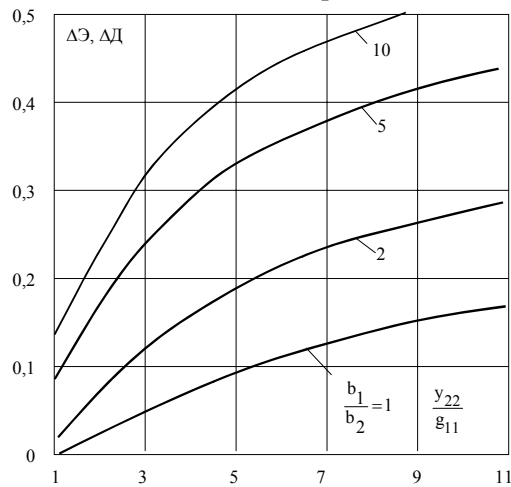


Рис. 9.1 Диаграмма для оценки степени повышения эффективности при обеспечении максимальной точности

Для иллюстрации на рисунке 9.1 приведена диаграмма для оценки степени повышения эффективности для наблюдения состояния в двухмерном пространстве наблюдения. Из нее следует, что при выборе оптимального способа измерения при значениях коэффициентов влияния и компонентов метрического тензора в диапазонах

$$3 \leq \frac{G_{22}}{G_{11}} \leq 11 \quad \text{и} \quad 2 \leq \frac{a_1}{a_2} \leq 10$$

на (30 ÷ 40) % увеличивается эффективность контроля по сравнению с выбором на основе метода равных погрешностей измерения.

**Оценка степени повышения эффективности путем обеспечения минимальной стоимости средств измерения.**

В этом случае степень повышения эффективности метрологического обеспечения можно оценить по формуле:

$$\Delta \mathcal{E} = 1 - \frac{C_{\min}}{C} \quad (9.6)$$

где:  $C$  - стоимость средств измерения объекта до совершенствования метрологического обеспечения,

$C_{\min}$  - стоимость средств измерения после совершенствования метрологического обеспечения.

Предположим, что суммарная погрешность измерения всех  $m$  параметров, характеризующих объект измерения, должна удовлетворять требованиям метрологического обеспечения и не превышать значения  $\delta_{\text{зад}}$ , а погрешности средств измерения - статистически независимые. Измерение параметров с погрешностями  $\delta_i$  позволяет оценить состояние объекта с погрешностью  $\delta$  (см. п. 3.3).

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^m G_{ii} \delta_i^2 \quad (9.7)$$

Исходя из выражения (5.8) стоимость средств измерения в этом случае равна

$$C = \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\delta_i} \quad (9.8)$$

Для оценки состояния объекта с погрешностью  $\delta_{\text{зад}}$  можно перераспределить частные погрешности  $\delta_i$  таким образом, чтобы уменьшить стоимость средств измерения. Воспользуемся решением обратной задачи выбора оптимального способа измерения (см. п. 6.1) и найдем оптимальные погрешности  $\delta_i^0$  измерения параметров  $x_i$  при заданной погрешности оценки состояния (см. формулу 6.37). Тогда минимальная стоимость средств измерения в соответствии с выражением (9.8) равна

$$C_{\min} = \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\delta_i^0} \quad (9.9)$$

Подставляя выражения (6.37), (9.8) и (9.9) в формулу (9.6) и учитывая, что в качестве ограничения принято выражение (3.25), из которого находится неопределенный множитель  $\lambda$ , получим

$$\Delta \mathcal{E} = 1 - \frac{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\beta_i^2 G_{ii}^0} \right)^3}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m G_{ii} \delta_i^2 \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\delta_i}}} \quad (9.10)$$

Из выражения (9.10) следует, что повышение эффективности метрологического обеспечения при обеспечении минимальной стоимости средств измерения зависит от первоначально предполагаемого выбора средств измерения с погрешностями  $\delta_i$ , от коэффициентов  $\beta_i$ , отражающих затраты на создание приборов и от компонент метрического тензора, характеризующего метрические свойства объекта контроля в старом  $G_{ii}$  и  $G_{ii}^0$  новом базисах.

Произведем оценку степени повышения эффективности контроля при выборе оптимального способа измерения по сравнению с выбором средств измерения, основанном на принципе равных погрешностей. Очевидно, что при  $\delta_i = \delta_k$  ( $i, k = 1, \dots, m$ ) имеем

$$\Delta \mathcal{E} = 1 - \frac{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\beta_i^2 G_{ii}^0} \right)^3}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m G_{ii} \sum_{i=1}^m \beta_i}} \quad (9.11)$$

Анализ выражения (9.11) показывает, что оно является функцией от  $2m$  переменных и изменяется от 0 до 1. При равенстве коэффициентов  $\beta_i = \beta_k$ , отражающих затраты на создание средств измерения и для объектов с метрическими свойствами, характеризующимися одинаковыми компонентами  $G_{ii} = G_{kk}$ , функция (9.11) равна нулю,  $\Delta\mathcal{E} = 0$ . В этом случае не наблюдается повышение эффективности. Но с увеличением разницы между компонентами метрического тензора, с одной стороны, и между затратами на создание приборов, с другой стороны, эффект может быть получен, но только за счет оптимального выбора параметров ( $G_{ii} \neq G_{kk}^0$ ). Он увеличивается при соблюдении следующих условий:

- с увеличением отношений  $G_{ii}/G_{kk}$  и  $\beta_i/\beta_k$ ;
- если параметры, которым соответствуют большие значения компонент метрического тензора, измеряются приборами, требующими меньших затрат;
- с ростом размерности пространства наблюдения.

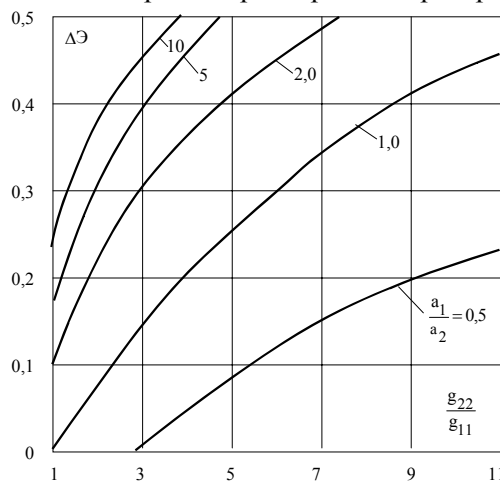


Рис 9.2. Диаграмма для оценки степени повышения эффективности при обеспечении минимальной стоимости.

На рисунке 9.2 приведена диаграмма для оценки степени повышения эффективности контроля для двухмерного пространства наблюдения. Из нее следует, что при выборе оптимального способа измерения в диапазонах

$$3 \leq \frac{G_{ii}}{G_{kk}} \leq 10 \quad \text{и} \quad 2 \leq \frac{\beta_1}{\beta_2} \leq 10$$

стоимость контроля уменьшается на (20 ÷ 50)% по сравнению со стоимостью контроля при выборе способа, основанного на принципе равных погрешностей измерения.

## 9.2. Достоверность контроля.

В настоящее время разработан ряд показателей, характеризующих количественную меру достоверности [2, 74, 75]. В большинстве случаев она связывается с вероятностью ошибочных решений при контроле.

Основными причинами, снижающими достоверность контроля, являются:

- методическое несовершенство контроля;
- получение ложной информации;
- недостаток необходимой для контроля информации.

Методическая достоверность контроля это составляющая достоверности контроля, определяемая совокупностью контролируемых параметров объекта, методикой контроля и принятыми в ней критериями оценки технического состояния [74]. Часто методическая достоверность не поддается оценке. Для уменьшения ее влияния на достоверность контроля в целом необходимо совершенствовать методику контроля с обоснованием критериев оценки технического состояния, осуществлять обоснованный выбор контролируемых параметров, производить адекватную аппроксимацию контролируемых характеристик и т.п.

Для практических расчётов учитывают две составляющие методической достоверности: полноту контроля и надёжность средств измерения.

Под полнотой контроля понимают составляющую методической достоверности контроля технического состояния

объекта ВВТ, характеризующую долю выявления всех возможных его отказов  $P_{0i}$  при выбранном методе контроля технического состояния от полной вероятности отказа  $Q$  объекта.

$$\pi = \frac{1 - \prod_{i=1}^T P_{0i}}{Q}; \quad (9.12)$$

С достаточной для практики точностью в случае, когда вероятность возникновения отказов подчиняется экспоненциальному закону, полнота контроля может быть определена по формуле [75]:

$$\pi = \lambda_k / \lambda_0, \quad (9.13)$$

где  $\lambda_k, \lambda_0$  - интенсивности отказов контролируемой части и аппаратуры в целом.

Второй составляющей методической достоверности является надёжность средств измерений. При эксплуатации различают два вида отказов: явные и метрологические (скрытые). На методическую достоверность оказывают влияние явные отказы. Они могут быть обнаружены на месте при эксплуатации средства измерений, которое в этом случае должно быть изъято из эксплуатации. Тем самым уменьшается полнота контроля из-за изменения  $P_{0i}$  в выражении (9.12).

Метрологические отказы выражаются в выходе за пределы допуска метрологических характеристик средств измерений и обнаруживаются при его поверке или аттестации. Они приводят к появлению ложных отказов или необнаруженных из-за недостатка информации отказов.

В качестве показателей степени достоверности контроля на обычно используют условную вероятность ложного отказа  $\alpha$  (вероятность ложного отказа при условии, что объект работоспособен) и условную вероятность необнаруженного  $\beta$  отказа (вероятность необнаруженного отказа при условии, что объект неработоспособен). Для их количественной оценки необходимо знать:

- закон распределения плотности вероятности параметра  $f(x)$ ;
- закон распределения плотности вероятности погрешности средства измерения  $f(y)$ ;
- верхнее  $x_B$  и нижнее  $x_H$  допустимые значения, которые может иметь работоспособный объект контроля;
- верхнее  $y_B$  и нижнее  $y_H$  значения результатов измерений параметра, характеризующие границы неопределенности результата измерения.

Условная вероятность ложного отказа  $\alpha$  рассчитывается по формуле [77]:

$$\alpha = \frac{\int_{x_H}^{x_B} f(x) \left[ \int_{-\infty}^{y_H-x} f(y) dy + \int_{y_B-x}^{\infty} f(y) dy \right] dx}{\int_{x_H}^{x_B} f(x) dx}, \quad (9.14)$$

Условная вероятность необнаруженного отказа  $\beta$  рассчитывается по формуле [77]:

$$\beta = \frac{\int_{-\infty}^{x_H} f(x) \left[ \int_{y_H-x}^{y_B-x} f(y) dy \right] dx + \int_{x_B}^{\infty} f(x) \left[ \int_{y_H-x}^{y_B-x} f(y) dy \right] dx}{\int_{-\infty}^{x_H} f(x) dx + \int_{x_B}^{\infty} f(x) dx} \quad (9.15)$$

В случае, когда законы распределения плотности вероятности для значений параметра и для погрешности его измерения неизвестны, их рекомендуется определять путем анализа факторов, формирующих отклонения параметра (погрешности измерения). Однако следует помнить, что в этом случае уменьшается методическая составляющая достоверности.

Из выражений (9.14) и (9.15) следует, что достоверность контроля в значительной степени зависит от обоснованности

выбора как допустимых значений параметров  $x_v$  и  $x_n$ , так и точности их измерения  $y_v$  и  $y_n$ .

Под достоверностью контроля в целом ( $D$ ) понимается показатель степени объективного отображения результатами контроля действительного технического состояния объекта контроля, который рассчитывается по формуле [74, 75]:

$$D = 1 - P_{ЛО} - P_{НО} \quad (9.16)$$

Это выражение показывает, что в результате контроля возможны три события, которые составляют полную группу событий, возникающих с соответствующей вероятностью:

- верная оценка возникшей ситуации ( $D$ );
- ложное восприятие ситуации, которой не было ( $P_{ЛО}$ );
- недооценка ситуации ( $P_{НО}$ ).

В свою очередь, используя свойства условных вероятностей [22], получим развернутое выражение для показателя

$$D = 1 - (P_{ДОП\alpha} + P_{НДОП\beta}), \quad (9.17)$$

где:  $P_{ДОП}$  – вероятность нахождения параметра в допуске;

$P_{НДОП}$  – вероятность нахождения параметра вне допуска.

Методы метрологического исследования объекта измерения позволяют определить исходные данные ( $x_v$  и  $x_n$ ,  $y_v$  и  $y_n$ ,  $P_{ДОП}$  и  $P_{НДОП}$ ), необходимые для расчета показателя достоверности (см. п. 4. и п. 6). По приведенным формулам (9.14 – 9.17) можно рассчитать показатели достоверности до ( $D_0$ ) и после ( $D_1$ ) проведения мероприятий по метрологическому совершенствованию объекта измерения. Для этого можно воспользоваться соотношением

$$\Delta D = \frac{D_1}{D_0} - 1 \quad (9.18)$$



Выражение (9.18) позволяет оценить степень повышения достоверности контроля в относительном виде по результатам метрологического исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев В.И. Информационная теория контроля и управления. Л.: Судостроение, 1973, 288 с.
2. Сычев Е.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники, М.: Воениздат, 1993.
3. Николаев В.И., Темнов В.Н. Об одном методе определения объективной и субъективной ценности информации при управлении. АН СССР Автоматика и телемеханика, 1972, № 9.
4. Харкевич А.А. О ценности информации. Проблемы кибернетики, № 4, 1960.
5. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978, 240 с.
6. Мозгалевский А.В., Калявин В.П., Костанди Г.Г. Техническое диагностирование электронных систем. Л.: Судостроение, 1984, 224с.
7. Левин М.И. Определение состава контролируемых параметров ДВС на основе информационного критерия. Судостроение, № 1, 1969.
8. Епифанов А.Д. Надежность автоматических систем. М.: Машиностроение, 1964.
9. Темнов В.Н. Использование номограмм для выбора предельно-допустимых значений параметров паротурбинной установки. -Сб. "Тенденции развития судовых турбинных установок" Л.: Судостроение, 1975.
10. Фишборн П.К. Методы оценки аддитивных ценностей. Статистическое измерение качественных характеристик (обзор). М.: Статистика, 1972.
11. Николаев В.И., Темнов В.Н. Об одном методе формирования экспертной оценки - Изв. АН СССР Техническая кибернетика, 1973, №6.
12. Маликов М.Ф. Основы метрологии. М.: 1949.

13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974.
14. Линник Б.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1962.
15. Дмитриев А.К. Мальцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем. Л.: Энергоатомиздат, 1988, 192 с.
16. ГОСТ 26656-85 Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования.
17. Голуб Е.С., Мадорский Е.З., Розенберг Г.Ш. Диагностирование судовых технических средств. М.: Транспорт, 1993.
18. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985, с. 247.
19. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука, 1971.
20. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. М.: Изд. стандартов, 1975.
21. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя, т.3, М.: Машиностроение, 2001, 858с.
22. Вентцель Е.П. Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1962.
23. Розенберг В.Я. Введение в теорию точности измерительных систем. М.: Сов. Радио, 1975, 304 с.
24. Гаджиев А.А., Степаненко Э.А. Об информационном методе выбора оптимального числа параметров СЭУ для ввода в систему централизованного автоматического контроля. Труды ЛКИ, вып.70, 1970, 27-34 с.
25. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1984,
26. Ватанабе С. и др. Оценка и отбор параметров в задачах распознавания образов. Сб. Автоматизированный анализ сложных изображений. М.: Мир, 1969.
27. Гнедов Г.М., Янушевский О.И. Судовые информационные устройства и испытательные системы. Л.: Судостроение, 1977г.

28. Автоматическая аппаратура контроля радиоэлектронного оборудования. Под редакцией Пономарева И.И. М.: Сов. радио, 1375, 328 с.
29. Браверман Э.М. Методы экстремальной группировки параметров и задача выделения существенных факторов. Автоматика и телемеханика, № I, 1970.
30. Жданов В.С. Статистические методы проектирования автоматизированных систем централизованного контроля и управления. Л.: Энергия, 1976.
31. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высшая школа, 1980.
32. Ахмедзянов А.М, и др. Диагностика состояния ВРД по термегазодинамическим параметрам. Машиностроение, 1983.
33. Староселец В.Г. Определение основных параметров объекта контроля. Изв. АН СССР Техническая кибернетика, №3, 1971.
34. Томпаков А.Б. Оптимизация множества диагностических параметров СЭУ. Судостроение, № 12, 1982.
35. Осис Я.Я. Диагностика сложных систем. Автореферат на соискание ученой степени д.т.н., Рига, 1972.
36. Евланов Л.Г, Контроль динамических систем. М.:Наука,1979,432 с.
37. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971.
38. Габасов Р., Кирилова Ф. Качественная теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1971.
39. Богородицкий А.А. и др. Анализ взаимосвязи стоимости и погрешности контрольного оборудования, в книге "Технологический контроль в приборостроении. М., 1977.
40. Шенброт И.М., Гинзбург М.Я. Расчет точности систем централизованного контроля. Л.: Энергия, 1970.
41. Соболев В.И. Информационно-статистическая теория измерений. Л.: Машиностроение, 1983.

42. Миф Н.П. О необходимой точности оценки погрешности технических измерений. Измерительная техника , № 9, 1983, 22-23 с.
43. Захаров Г.А. О критериях выбора точности контроля судовых технических средств. Судостроение, № 10, 1982, 24 - 27 с.
44. Крылов А.Н. Лекции о приближенных вычислениях. М.-Л.: Гос. изд. тех-теор. лит., 1950.
45. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Наука, 1969.
46. Дунин-Барковский И.В., Смирнов Н.В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике. М.: Гос. изд.тех-теор. лит. ,1950.
47. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978.
48. Осис Я.Я., Синегубова Л.Н. Алгоритм определения минимизированной совокупности параметров контроля работоспособности сложного объекта. – сб. Кибернетика и диагностика. - Рига, Знание, 1968.
49. Зыков А.А. Теория конечных графов. Ч.1, Новосибирск, Наука, 1969, 543с.
50. Берж К. Теория графов и ее применение. М.: Иностранная литература, 1962, 319 с.
51. Черкез А.Я. Инженерный расчет газотурбинных двигателей методом малых отклонений. М.: Машиностроение, 1975.
52. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки М.- Л. Энергия, 1966, 288 с.
53. Темнов В.Н. Оптимальное измерение вектора состояния детерминированного объекта. Изв. ВУЗов, Приборостроение, №1, 1987.
54. Михайлов А.В., Савин С.К. Точность радиоэлектронных устройств. Анализ и синтез точности радиоэлектронных устройств летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1976, 211 с.
55. Розенwasser С.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981.

56. Коротков В.Н., Тайц О.А. Основы метрологии. М.: Высшая школа, 1978.
57. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.; Гостехиздат, 1953.
58. Каган В.Ф. Основы теории поверхностей в тензорном изложении. ОГИЗ, 1947.
59. Мещеряков Г. А. Теоретические основы математической картографии. М.: Недра, 1968.
60. Ефимов Н.В. Квадратичные формы и матрицы. М.: Наука, 1975.
61. Темнов В.Н. К проблеме оптимального наблюдения детерминированных систем. - АН СССР, Автоматика и телемеханика, № 4, 1986.
62. Красовский Н.Н. Теория управления движениями. М.: Наука, 1968.
63. Д'Анжело Г. Линейные системы с переменными параметрами. М.: Машиностроение, 1974.
64. Воронов А.А. Устойчивость. Управляемость. Наблюдаемость. М.: Наука, 1979.
65. Темнов В.Н. Значение информации при управлении и обслуживании. - Судостроение, 1985, № 6.
66. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978, 262с.
67. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984.
68. Темнов В.Н., Малкин Г.М., Вишняков О.Г, Использование методов прогнозирования при наладке судового оборудования. - Вопросы судостроения, серия технология судостроения, вып. 19, 1978, 14-21с.
69. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977, 200 с.
70. Применение паспортных диаграмм для решения некоторых практических задач, возникающих при эксплуатации надводных кораблей. - Бюллетень кораблестроения, эксплуатации и ремонта кораблей, №20,21, 1966.

71. Селиванов М.Н., Фридман А.Е., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений: метрологическая справочная книга.- Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
72. Круг Г.К., Сосулин Ю.А., Фатуев В.А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. М.: Наука, 1977.
73. Чуев Ю.В., Михайлов Ю. Б., Кузьмин В. И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. М.: Советское радио, 1975.
74. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1974.
75. РД В 319.01.13-99. Оценка метрологического обеспечения. Мытищи, 1999.
76. ОТТ 1.1.7-89 Системы и комплексы ВВТ. Общие требования по метрологическому обеспечению.
77. Автоматизация радиоизмерений /Под ред. В.П. Балашова. М.: Сов. радио, 1966. 527 с.
78. ГОСТ РВ 8.573–2000 ГСИ. Метрологическая экспертиза образцов ВВТ.
79. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. – М.: Издательство МЭИ, 1999. 168с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КОРАБЕЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА КАК ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЯ.	5
1.1. Общая характеристика КЭУ.	5
1.2. Анализ систем контроля КЭУ.	9
1.3. Требования к метрологическому обеспечению корабельных энергетических установок.	17
1.3.1. Задачи метрологического обеспечения.	17
1.3.2. Количественные показатели метрологического обеспечения.	20
1.3.3. Основные направления метрологического обеспечения.	24
1.3.4. Задачи метрологического исследования корабельных технических средств.	26
1.3.5. Обеспечение единства и точности измерений при эксплуатации корабельных технических средств.	34
2. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИЗМЕРЕНИЯ КЭУ	40
2.1. Классификация параметров объекта измерения.	40
2.2. Критерии важности параметров	46
2.2.1. Информационная ценность параметра.	49
2.2.2. Целевая ценность параметров.	51
2.2.3. Важность элементов энергетической установки.	53
2.3. Параметры состояния и параметры наблюдения объекта измерения.	57
2.4. Область работоспособности объекта измерения.	70
3. ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ	77
3.1. Предназначение погрешностей	77
3.2. Классификация погрешностей измерения	79
3.3. Методы суммирования погрешностей результата измерения	86
3.3.1. Прямые измерения	86



3.3.2. Косвенные измерения	94
3.4. Погрешность оценки состояния объекта измерения	98
3.5. Выбор точности измерений	107
4. ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЦ ОБЛАСТИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ.	115
4.1. Методы обоснования предельных значений параметров.	115
4.2. Методы обоснования допусковых значений параметров.	120
4.3. Надежность, вероятность и допусковое значение контролируемого параметра	122
4.4. Анализ факторов, влияющих на оценку допусковых значений параметров.	131
4.5. Влияние старения и износа на выбор допусковых значений параметров.	138
5. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ.	148
5.1. Краткий обзор методов выбора параметров.	148
5.2. Предварительный анализ объекта измерения для выбора параметров.	153
5.3. Формирование ограничений для выбора контролируемых параметров.	157
5.3.1. Влияние метрологических требований на выбор контролируемых параметров.	159
5.3.2. Влияние погрешности измерения на метрологические показатели.	163
5.3.3. Влияние погрешности измерения на эффективность контролируемого оборудования.	167
5.4. Методы обоснования выбора контролируемых параметров.	169
5.4.1. Метод ранжирования параметров.	170
5.4.2. Ранжирование параметров по критерию запаса надежности.	173
5.4.3. Топологический метод.	178
5.4.4. Аналитический метод.	192

6.ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ	203
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	
6.1 Математическая постановка задачи.	203
6.2. Минимизация погрешности совместных измерений при ограниченных ресурсах.	208
6.2.1. Обеспечение оптимальной суммарной погрешности совместных измерений.	208
6.2.2. Обеспечение минимальной погрешности косвенного измерения.	218
6.2.3 Обеспечение минимальной стоимости измерений.	222
6.2.4. Оптимальное соотношение погрешностей измерения параметров.	225
6.3. Выбор оптимальной совокупности контролируемых параметров.	230
6.3.1. Использование метрологических показателей для оптимизации.	230
6.3.2. Использование метрических свойств объекта измерения для оптимизации.	231
6.3.3. Выбор совокупности параметров, обеспечивающей максимальную точность измерения.	240
6.3.4. Обеспечение минимальной стоимости измерений при выборе совокупности параметров.	246
7. ДИНАМИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ.	248
7.1. Наблюдаемость детерминированных динамических объектов.	248
7.2. Постановка задачи оптимального наблюдения.	252
7.3. Линейная стационарная динамическая система.	253
8. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	264
АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ.	
8.1. Метрологическая аттестация алгоритмов.	264
8.2. Статистическая обработка многократных отсчетов.	266
8.3. Расчет обобщенных показателей.	275
8.4. Прогнозирование характеристик энергетической установки.	283

8.4.1. Повышение достоверности прогнозирования.	283
8.4.2. Доверительные интервалы прогноза.	289
8.4.3. Способы определения коэффициента дисперсии предсказания.	293
8.5. Экстраполяция характеристик энергетической установки.	302
9. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТА ИЗМЕРЕНИЯ.	310
9.1. Эффективность метрологического обеспечения.	310
9.2. Достоверность контроля.	317
ЛИТЕРАТУРА	322