

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

А. Г. Варжапетян

КВАЛИМЕТРИЯ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2005

УДК 65.23-80; 30-607
ББК 681.0.03; 519ю816
В18

Варжапетян А. Г.

В18 Квалиметрия: Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 2005. 176 с.: ил.
ISBN 5-8080-0138-9

В пособии рассматриваются вопросы количественной оценки характеристик качества.

Предназначено для студентов специальностей 3401 – «Управление качеством», 190800 – «Метрология и метрологическое обеспечение», 521500 – «Менеджмент».

Рецензенты:
кафедра менеджмента Санкт-Петербургского
электротехнического университета;
кафедра управления качеством Санкт-Петербургского
инженерно-экономического университета

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия
Учебное издание

Варжапетян Артемий Георгиевич

КВАЛИМЕТРИЯ

Учебное пособие

Редактор *В. П. Зуева*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Сдано в набор 30.11.04. Подписано к печати 29.04.05. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,34. Усл. кр.-отт. 10,47. Уч. -изд. л. 11,13.
Тираж 100 экз. Заказ № 202.

Редакционно-издательский отдел
Отдел электронных публикаций и библиографии библиотеки
Отдел оперативной полиграфии
СПбГУАП

190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67

ISBN 5-8080-0138-9

© ГОУ ВПО «СПбГУАП», 2005

© А. Г. Варжапетян, 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы произошел ряд серьезных изменений в отношении общества к проблеме качества, в целом, и отдельным его направлениям, в частности. Так, на рубеже двух тысячелетий, были приняты основополагающие нормативные документы МС ИСО 9000:2000 и на их основе российский ГОСТ Р ИСО 9000-2001. Эти стандарты, внося ряд принципиальных изменений в осознание проблемы качества, определили на долгое время идеологию менеджмента качества. Для успешного претворения в жизнь основных положений стандартов, необходимы грамотные управленцы, владеющие методами менеджмента качества. Недаром, во многих российских вузах открылась новая техническая специальность 340100 «Управление качеством», а в рамках магистерской подготовки менеджеров появились специализации по менеджменту качества.

Квалиметрия является одним из направлений теории качества (квалитологии), находящей все большее применение в различных сферах человеческой деятельности. До сих пор не существует единой точки зрения на место квалиметрии в ряду научных дисциплин. Некоторые авторы [15] считают квалиметрию областью прикладной метрологии, некоторые [12] – базисной теорией технического проектирования. Истина, как это чаще всего бывает, лежит посередине, поэтому в пособии рассмотрены основные идеи квалиметрии, а не ведется научная дискуссия.

В квалиметрию, как в любую техническую дисциплину, активно внедряются методы информационных технологий, в связи с этим в пособии рассмотрена возможность применения к известным теоретическим методам квалиметрии [1–3, 12, 14, 15] методов информационных технологий (разд. 5, 6) [5–7, 9]. Первые четыре раздела содержат материалы, посвященные рассмотрению методов и средств квалиметрии. Во введении даны основные определения, понятия и классификация направлений квалиметрии. В приложениях приведены основные сведения из теории математической статистики. Это делается сознательно, так как многолетний опыт преподавания показывает, что студенты не воспринимают общих идей математической статистики, несмотря на то, что основы ее преподаются в третьем семестре (курс прикладной математики).

Пособие предназначено для студентов специальности 3401 «Управление качеством», которым читается курс «Квалиметрия» и студентам направления 521500 «Менеджмент», которым читается курс «Исследование систем управления». Пособие также может быть рекомендовано студентам технических специальностей.

Пособие подготовлено А. Г. Варжапетяном на базе лекций, читаемых им на протяжении нескольких лет.

По мнению автора, изложение материала необходимо предварить перечнем используемых в пособии терминов. Это тем более важно, что Интернет, к услугам которого охотно обращаются студенты, перегружен публикациями и терминологией, основанными на стандартах ИСО 9000-94, что вносит определенную путаницу. Так, основополагающее определение «качество» имеет принципиальное отличие в стандартах 1994 и 2000 гг. Кроме того, сама идеология применения стандартов, также претерпела изменения [6]. Поэтому для настоящего пособия важно дать стандартизованные определения главных понятий, используемых в квалиметрии. Источником приведенных терминов являются:

- ГОСТ Р ИСО 9000-2001. Системы менеджмента качества.
- МС ИСО 19011-02. Руководящие материалы по аудиту систем менеджмента качества.
- «Большая энциклопедия Кирилла и Мефодия» 2003 г.

Глоссарий

Аудит (англ. *audit* – проверка, от лат. *audit* – он слышит), *систематический, независимый и документированный процесс получения свидетельств аудита и объективного их оценивания с целью установления степени выполнения согласованных критериев аудита*. Различают внешний аудит (осуществляемый независимой аудиторской компанией) и внутренний аудит (для проверки эффективности менеджмента). Цель аудита – определить степень достоверности информации, содержащейся в отчетности, и ее соответствие закону.

Бенчмаркинг – процесс сравнительного анализа альтернатив (концепций, компонентов, продукции и т. д.), целью которого является количественная оценка лучшей альтернативы.

Величина – количественная характеристика размера, обобщение конкретных понятий: длины, площади, веса и т. п. Выбрав одну из величин данного рода за единицу измерения, можно выразить числом отношение любой другой величины того же рода к единице измерения. В более общем смысле, скалярной величиной, или скаляром, называется объект, полностью характеризующийся заданием одного числа.

Единица измерения – условное значение, по сравнению с которым определяется величина размера.

Измерение – совокупность действий, выполняемых при помощи средств измерений с целью нахождения числового значения измеряемой величины в принятых единицах измерения. Различают прямые измерения (например, измерение длины проградуированной линейкой) и косвенные измерения, основанные на известной зависимости между искомой величиной и непосредственно измеряемыми величинами.

Изоквалита – значения, соответствующие равному качеству (различают изоквалитные линии или поверхности).

Информация – *значимые данные*.

Качество – *степень соответствия присущих характеристик требованиям*.

Примечание 1. Термин «качество» может применяться с такими прилагательными, как плохое, хорошее или отличное.

Примечание 2. Термин «присущий» в отличии от термина «присвоенный» означает имеющийся в чем-то. Прежде всего, это относится к постоянным характеристикам.

Квалиметрия – (от лат. *qualis* – какой по качеству и греч. *metreo* – измеряю), отрасль науки, изучающая и реализующая методы количественной оценки качества продукции.

Кластер – (англ. *cluster*), термин в информатике и квалиметрии, обозначающий группу объектов с общими признаками. В программиро-

вании и компьютерной технике кластерами называют далекие друг от друга понятия. Термин происходит из теории распознавания образов. В программировании кластером называют описатель абстрактного типа данных. В жестком диске компьютера кластер – это группа блоков, определяемая как единое целое.

Контроль – процедура оценивания соответствия путем наблюдений и суждений, сопровождаемых соответствующими измерениями, испытаниями или калибровкой.

Коэффициент значимости – показатель, выраженный относительной величиной, представляющей весовое значение конкретной характеристики (свойства).

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физических величин заданного размера. Меры используют как эталоны, образцовые или рабочие средства измерений. В зависимости от погрешностей меры подразделяют на классы точности.

Метрологическая характеристика – отличительная особенность, которая может повлиять на результаты измерения.

Мозговой штурм – метод принятия решений группой специалистов по эвристическому алгоритму при отсутствии полной и неформализованной информации.

Оценивание – процесс определения соответствия заданным нормам, бывает качественным и количественным.

Параметр – (в технике) количественная величина, характеризующая какое-либо свойство процесса, явления или системы, машины, прибора (например, электрическое сопротивление, теплоемкость, быстроедействие, масса, коэффициент трения и др.). Параметры могут быть сосредоточенными (например, емкость электрического конденсатора, масса подвешенного к балке груза) и распределенными в пространстве (например, индуктивность линии электропередачи).

Поправка – разность между показанием средства измерения и истинным значением измеряемой величины. Обычно характеризуется мерами случайной величины – математическим ожиданием и дисперсией.

Потребитель – организация или лицо, получающие продукцию.

Примеры – клиент, заказчик, конечный пользователь, розничный торговец, бенефициар и покупатель.

Примечание. Потребитель может быть внутренним или внешним по отношению к организации.

Правильность – показание средства измерения с учетом внесенной поправки.

Продукция – результат процесса.

Примечание 1. Имеются четыре общие категории продукции:

- услуги (например, перевозки);
- программные средства (например, компьютерная программа, словарь);
- технические средства (например, узел двигателя);
- перерабатываемые материалы (например, смазка).

Многие виды продукции содержат элементы, относящиеся к различным общим категориям продукции. Отнесение продукции к услугам, программным средствам, техническим средствам или перерабатываемым материалам зависит от преобладающего элемента. Например, поставляемая продукция «автомобиль» состоит из технических средств (например, шин), перерабатываемых материалов (горючее, охлаждающая жидкость), программных средств (программное управление двигателем, инструкция водителю) и услуги (разъяснения по эксплуатации, даваемые продавцом).

Примечание 2. Услуга является результатом, по меньшей мере одного действия, обязательно осуществленного при взаимодействии поставщика и **потребителя**, она, как правило, нематериальна. Предоставление услуги может включать, к примеру, следующее:

- деятельность, осуществленную на поставленной потребителем материальной продукции (например, автомобиль, нуждающийся в ремонте);
- деятельность, осуществленную на поставленной потребителем нематериальной продукции (например, заявление о доходах, необходимое для определения размера налога);
- предоставление нематериальной продукции (например, знаний);
- создание благоприятных условий для потребителей (например, в гостиницах и ресторанах).

Программное средство содержит информацию и обычно является нематериальным, может также быть в форме подходов, операций или процедуры.

Техническое средство, как правило, является материальным и его количество выражается исчисляемой **характеристикой**. Перерабатываемые материалы обычно являются материальными и их количество выражается непрерывной характеристикой. Технические средства и перерабатываемые материалы часто называются товарами.

Процесс – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности, преобразующая входы в выходы.

Примечание 1. Входами к процессу обычно являются выходы других процессов.

Примечание 2. Процессы в организации, как правило, планируются и осуществляются в управляемых условиях с целью добавления ценности.

Примечание 3. Процесс, в котором подтверждение соответствия конечной **продукции** затруднено или экономически нецелесообразно, часто относят к «специальному процессу».

Размер – свойство количественной определенности объекта и его характеристик и параметров. Размер и его величина может иметь фи-

зический или нефизический смысл. Размер обладает размерностью, отношение величин, имеющих одинаковую размерность, приводит к получению безразмерной величины.

Размерность физической величины – выражение, показывающее связь данной величины с физическими величинами, положенными в основу системы единиц; записывается в виде произведения символов соответствующих основных величин, возведенных в определенные степени, которые называются показателями размерности. Так, размерность ускорения (символ a) записывается в виде $[a] = LT^{-2}$, где L – символ длины; T – времени; а степень (-2) – показатель размерности времени. Величины, в которые все основные величины входят в степени, равной нулю, называются безразмерными.

Свойство – внешнее проявление внутренней сущности объекта, количественные значения свойств носят название параметров, качественные чаще называются **характеристиками** или альтернативами.

Статистическая шкала – упорядоченное объединение (кортеж) эмпирического множества фактов, множества их числовых соответствий и функции, переводящей элементы множеств из одного в другое. Шкала прибора не является статистической шкалой, а представляет числовое отображение функции.

Таксономия – (от греч. *taxis* – расположение, строй, порядок и *nomos* – закон), теория классификации и систематизации сложноорганизованных областей действительности, имеющих обычно иерархическое строение (органический мир; объекты географии, геологии, языкознания, этнографии, продукции и т. д.). Термин (предложен в 1813 г. швейцарским ботаником О. Декандолем) длительное время употреблялся как синоним систематики. В 60–70-х гг. XX в. возникла тенденция определять таксономию как раздел систематики, рассматривающий систему таксономических категорий, обозначающих соподчиненные группы объектов – **таксоны**.

Точность – (в технике) степень приближения истинного значения параметра **процесса**, вещества, предмета к его номинальному значению. Различают точность механической обработки, механизмов, систем автоматического управления, ЭВМ, измерения. Точность измерения – характеристика измерения, отражающая степень близости его результатов к истинному значению измеряемой величины. Численно точность измерения – величина, обратная относительно погрешности измерений R_0 ; так, при $R_0 = \pm 10^{-5}$ точность измерения равна 10^5 . Точность меры и измерительного прибора – степень близости значений меры или показаний измерительного прибора к истинному значению величины, воспроизводимой мерой или измеряемой при помощи прибора.

Требование – потребность или ожидание, которое установлено, обычно предполагается или является обязательным.

Примечание 1. «Обычно предполагается» означает, что это общепринятая практика организации, ее потребителей и других заинтересованных сторон, когда предполагаются рассматриваемые потребности или ожидания.

Примечание 2. Для обозначения конкретного вида требования могут применяться определяющие слова, например, требование к продукции, требование к системе качества, требование потребителя.

Примечание 3. Установленным требованием является такое требование, которое определено, например, в документе.

Примечание 4. Требования могут выдвигаться различными заинтересованными сторонами.

Характеристика – отличительное свойство.

Примечание 1. Характеристика может быть собственной или присвоенной.

Примечание 2. Характеристика может быть качественной или количественной.

Примечание 3. Существуют различные классы характеристик, такие, как:

- физические (например, механические, электрические; химические или биологические характеристики);
- органолептические (например, связанные с запахом, осязанием, вкусом, зрением, слухом);
- этические (например, вежливость, честность, правдивость);
- временные (например, пунктуальность, безотказность, доступность);
- эргономические (например, физиологические характеристики, или связанные с безопасностью человека);
- функциональные (например, максимальная скорость самолета).

Шкала – совокупность упорядоченных отметок и/или цифр, соответствующих ряду последовательных оценок измеряемых величин.

В квалитметрии, наряду со стандартным определением – *статистическая шкала*, используются также названия *квалитметрическая или измерительная шкала*.

Экспертиза – (франц. *expertise*, от лат. *expertus* – опытный), исследование специалистом (экспертом) каких-либо вопросов, решение которых требует специальных познаний в области науки, техники, искусства и т. д.

Эталон (база) – (франц. *etalon*), мера или измерительный прибор, служащий для воспроизведения, хранения и передачи единиц какой-либо величины. Эталон, утвержденный в качестве основного для страны, называется Государственным эталоном. В переносном смысле – мерило, образец, базовое значение.

Примечание. Пояснение терминов, выделенные курсивом, взяты из ГОСТ Р ИСО 9000-2001[8].

ВВЕДЕНИЕ

1. Общее представление о квалиметрии

На зарождение квалиметрии, как науки, повлияло два фактора:

- Появление в 50-е гг. XX в. многочисленных эмпирических методик количественной оценки качества продукции.
- Необходимость теоретического обоснования этих методик и повышение корректности этих методов.

Появление квалиметрии в России (первое упоминание в 1968 г. в журнале «Стандарты и Качество» № 1) привело к нескольким следствиям:

– Русские ученые привыкли считать научное направление дееспособным, если оно пришло с Запада и признано на Западе. Хотя, в настоящее время, западные специалисты широко используют результаты русских ученых без ссылки на источники.

– У специалистов возникает вопрос, чем квалиметрия отличается от других научных дисциплин, схожих по методам исследования (исследование операций, анализ иерархий, теория полезности). В качестве возражения отметим, что монография Т.Саати по теории исследования иерархий вышла через 8 лет после появления в СССР первых публикаций по квалиметрии и практически является частным случаем теории квалиметрии. Теория полезности и квалиметрия – две разные науки, это убедительно доказано Г. Г.Азгальдовым [1].

– Ставится под сомнение принципиальная возможность выразить одним комплексным показателем многообразие, различных по физическим характеристикам, свойств продукции. Это утверждение также является несостоятельным [2].

Тем не менее, квалиметрия является междисциплинарным инструментом исследования. В СССР проводилась большая работа по внедрению квалиметрических оценок, было подготовлено постановление правительства о широком внедрении методов квалиметрии, но наступил 1991 г., и все рухнуло. В настоящее время внедрение методов квалиметрии идет крайне медленно.

Отметим основные причины, сдерживающие развитие квалиметрии.

- Отсутствует научно-организационная структура.
- Нет печатного органа.

– Количество практических методик оценки качества крайне ограничено и явно отстает от потребностей производства из-за неосведомленности специалистов или отторжения со стороны управленцев.

– Сами методики не учитывают специфики разрабатываемых изделий и не могут претендовать на роль объективного судьи. В квалитметрических задачах надо решать задачи ранжировки и оценивания, с первой – методики справляются, а со второй – не очень.

Рассмотрим кратко потенциальные возможности методов квалитметрии:

1. Уточнение социально-экономической информации

Любой процесс оценивается количеством единиц продукции, полными затратами на единицу продукции, качеством одной единицы. Первая компонента учитывалась всегда, методики оценки второй постоянно совершенствуются, третья компонента практически не учитывается. Учет количественных характеристик качества позволит уменьшить погрешность расчетов при принятии решения в задачах:

– совершенствования механизма ценообразования, влияющего на величину национального дохода, объема валового национального продукта, темпов изменения роста народного хозяйства и т. д.

– определения уровня развития отдельных отраслей по сравнению с мировыми достижениями.

– количественного выражения уровня и качества жизни населения.

2. Повышение эффективности управленческих решений

Качество принимаемого решения зависит от числа рассмотренных вариантов и способности выбрать из них лучший. В этом направлении прекрасным помощником являются средства информационных технологий, в частности, метод имитационных испытаний.

3. Повышение эффективности работы

Методы квалитметрии могут быть применены для оценки качества труда по регламентированной системе показателей: повышение темпов роста производства, обеспечение принципа постоянного улучшения [8].

При использовании квалитметрии для решения многоаспектных задач всегда возникает два вопроса:

– Нужно ли проводить в конкретном случае квалитметрическую оценку?

– Можно ли провести эту оценку?

Первые случаи оценки качества известны с давнего времени, так гончары острова Крит (XV в. до н. э.) маркировали свои изделия специальным знаком. Древнейшим примером экспертизы является дегустация вин. Уже в 1549 г. в Падуанском университете появилась первая кафедра товароведения. В конце XIX в. появилась оценка продук-

ции с помощью баллов. Впервые в России аналитический метод конструкций предложил известный кораблестроитель – академик А. Н. Крылов. В 1979 г. ГОСТ 15467 «Управление качеством продукции» ввел термин «квалиметрия» – отрасль науки, изучающая методы измерения и количественной оценки показателей.

В предисловии уже было отмечено, что спор о первичности метрологии или квалиметрии до сих пор не привел к каким-то четким выводам и напоминает старую схоластическую задачу о том, что раньше появилось курица или яйцо. Автор ни в коей мере не собирается вставать на чью-либо сторону и является сторонником того, что раз квалиметрия позволяет количественно оценивать совокупность разнородных физических и нефизических характеристик, то это крайне важно для практических применений, и этим надо заниматься.

Рассмотрим более подробно этимологию этих двух понятий.

Метрология – наука об измерениях, методах достижения их единства и точности (*metron* – мера, *logos* – учение), речь идет о количественных измерениях. Еще до нашей эры египтяне и китайцы для измерений пользовались подручными средствами: карат – семя боба, горошина; гран – зерно; пядь – расстояние между большим и указательным пальцами, и естественными мерами: мина – скорость вытекания 500 г воды из сосуда; время – кратное периоду смены времен года и т. п.

Квалиметрия – наука о количественных измерениях характеристик качества (*qualis* – какой по качеству, *metreo* – измеряю). Речь идет об альтернативных характеристиках, большинство из которых не могут быть измерены непосредственно, а определяются сравнением (хуже – лучше, больше – меньше). Первоначально эти науки существовали раздельно. Процесс познания всегда объединял оценку окружающей нас действительности (материальное начало) и трансформацию этой оценки в умах исследователя в интересах общества или отдельных групп (субъективное – идеальное начало). В философии материальное и идеальное рассматриваются как реальности, находящиеся в диалектическом единстве, взаимодействии и взаимопроникновении.

В настоящее время сфера идеального, представляет собой информационное поле, а точнее, взаимодействие полей. Сложность объекта познания приводит к понятию системности всего сущего и необходимости системного подхода [5–7]. Информационное поле состоит из различных потоков информации, создающих не только само поле, но и информационный образ объекта, а именно:

– Поток внешней информации в виде книг, баз данных, результатов фундаментальных исследований и т. д.

– Поток внутренней информации в виде расчетов, результатов компьютерного моделирования, экспериментов, опыта и навыков исследователей и т. д.

– Поток сигналов управления в виде маркетинговой и таргетинговой информации, управляющих воздействий менеджмента (анализ, выработка и принятие решений, реализация решений и контроль).

Интеграция этих потоков создает информационный образ объекта, существующий в условиях противодействия среды. Сама среда состоит из множества сфер: физической, биологической, психологической, технической, экономической, социально-политической и информационной. Все эти сферы взаимосвязаны, более того, проникают друг в друга и взаимообусловлены. Все это приводит к необходимости проводить квалиметрические оценки и принимать решения в условиях нечеткости и размытости, как исходных данных, так и целевых посылок. Сами сферы содержат многие компоненты и основываются на определенном базисе. В таблице приведены без комментариев упомянутые сферы.

Таблица

Компоненты базиса и сфер [5]

Наименование сферы	Компоненты базиса	Компоненты сферы
Физическая (физиоценоз)	Составляющие материи: движение, энергия, информация	Физические объекты: частицы, атомы, тела, вакуум
Биосфера (биоценоз)	Атмосфера, почва, гидросфера	Животные, растения, микроорганизмы
Психическая (психоценоз)	Физические ощущения (сенсоры), действия (эффекторы), нервная система	Подсознание, сознание, сверхсознание
Техническая (техноценоз)	Физические, интеллектуальные, биологические ресурсы	Сельское хозяйство, промышленное производство
Экономическая (экоценоз)	Потребляемые ресурсы, средства производства, продукция	Рынок труда, товаров, капитала
Социально-политическая (социоценоз)	Общественное сознание, экономические, демографические ресурсы	Граждане, их объединения, органы власти
Информационная (информоценоз)	Технологические, экономические, интеллектуальные ресурсы	Наука, искусство, религия

Объекты познания, независимо от того принадлежат они к материальному или идеальному миру, всегда достаточно сложны. Поня-

тия сложности и системности подробно рассмотрены в монографиях автора [5,6]. Сам процесс познания бесконечен, достаточно вспомнить парадокс Аристотеля: о расширении границы незнаемого, по мере увеличения области познанного, или высказывание Платона: – «я знаю, что я ничего не знаю». При познании объекта создается его модель, вначале грубая, потом более совершенная. Приведем несколько примеров:

а) модель атома – элементарная неделимая частица Демокрита, затем планетарная модель Резерфорда, затем квантовая модель Бора,...?

б) модели Вселенной: в древности геоцентрическая, затем с позиции Галилея и Коперника – гелиоцентрическая, сейчас – галактическая,...?

Учет все новых и новых *свойств* затрудняет процесс познания, делает его трудоемким и дорогостоящим, заставляя обращаться к методам компьютерного моделирования.

Рассмотрим возможные виды моделей сущего и мыслимого, встречающихся в процессе познания.

Тип 1. Объяснение (согласование фактов), например кинетическая теория, цикл Карно.

Тип 2. Гипотеза (предтеча теории, такое может быть...). Наутилус – Жюль Верна. Гельмгольц с тремя рецепторами в глазу (красный – желтый – синий).

Тип 3. Оценочная (сколько будет?). Определение количественных данных для практической работы. Ньютон, рассчитавший массу планеты, оценка калорийности.

Тип 4. Феноменологическая (явления происходят так, как если бы...) Солярис – С. Лема, линии Фарадея.

Тип 5. Приближение (что-то очень большое, что-то очень маленькое). Земля для землемера представляется плоской; для мореплавателя круглой; для космонавта геоидом (т. е. всегда необходимо сравнивать с чем-либо). Если не с чем сравнивать, модель теряет смысл. Запомним это обстоятельство, имеющее важное значение для качественных оценок.

Тип 6. Упрощение (отбрасывание некоторых деталей). Большинство моделей построено с учетом этого принципа. Ошибки, возникающие при этом, всегда являются камнем преткновения на пути исследователя.

Тип 7. Ограничение (существование предела). Скорость света по теории Эйнштейна (кстати, оспариваемая рядом физиков), абсолютная температура по Кельвину.

Тип 8. Расширение (снятие предела). В технике и физике – открытия и изобретения (сверхпроводимость, сверхчувствительность – запах по одной молекуле), в воинской науке – победы.

Тип 9. Предположение (что будет, если будет так...). Жюль Верн – со своим таинственным островом; Ю. Семенов – с эпопеей о Штирлице.

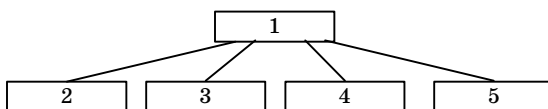
Тип 10. Математическая модель (неизвестно, как это происходит, но можно вычислить, сколько будет, если...). К этому типу относится большинство используемых в науке моделей.

Тем не менее, используя далее только математические модели, будем использовать в них принципы некоторых приведенных ранее моделей.

В качестве заключения к этому разделу, приведем афоризм Конфуция: – «Если не знаешь точно, что нужно делать, не делай ничего».

2. Классификация квалиметрий

Уточним, что понятие квалиметрии включает в себя теорию, методы и средства измерения и оценки качества любых создаваемых или используемых человеком объектов и процессов, являясь в то же время разделом квалитологии (науки о качестве). Укрупненная структура разделов квалитологии показана на рисунке.



Структура квалитологии: 1 – квалитология;
2 – теория качества (*off* и *on-line*); 3 – менеджмент качества;
4 – системы качества (в том числе сертификация и аккредитация);
5 – квалиметрия

Изучению структурных единиц 2,3,4 (рисунок) будут посвящены специальные лекционные курсы. В настоящем пособии будем рассматривать вопросы, относящиеся непосредственно к структурной единице 5 (рисунок).

Квалиметрия – выступает взаимосвязанной системой теорий различной степени общности. К числу теорий можно отнести [12]:

- *общую квалиметрию*, рассматривающую систему понятий, теорию измерений и оценивания, теорию статистических шкал;
- *специальные квалиметрии* (методы и модели оценок), к ним относятся:

а) экспертная квалиметрия, где оценки даются экспертами или автоматизированными экспертными системами;

б) вероятностно-статистическая квалиметрия, использующая методы теории вероятностей и математической статистики, оценивая однородность генеральной совокупности и выборки, совпадение законов распределения, эргодичность, марковость и тому подобное;

в) индексная квалиметрия, использующая меры качества, полученные при нормировке на базе индексации (сравнения);

г) таксономическая квалиметрия (или квалиметрическая таксономия), основывающаяся на классах качества (квалитаксонах) объекта, при этом рассматриваются вид, сорт и т. п. объекта и такие же характеристики классифицирующей системы;

– *предметную квалиметрию* (по предмету оценивания) – продукции, труда, проектов, процессов.

В свете сказанного можно сужать область применения квалиметрии до оценивания показателей отдельных свойств или расширять до количественно неизмеримых объектов, пытаясь дать комплексную оценку.

В настоящее время уже появились такие названия, как социологическая квалиметрия, географическая квалиметрия и так далее.

Более подробное рассмотрение аналитических моделей производится далее в основных разделах пособия.

1. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА

1.1. Свойства и потребности

Учитывая, что качество всегда имеет и экономическое содержание, связанное с потребительной стоимостью и стоимостью, весьма важным является учет характеристик (показателей) качества при оценке эффективности хозяйственных структур. Тогда методы измерения экономических свойств объектов и процессов (эконометрика) становятся частью квалиметрии (экономической квалиметрии).

Измерение социальных, экономических и технических сторон объектов придает квалиметрии общенаучный и системный статус и делает ее междисциплинарной наукой.

Отметим, что современная математика все больше изучает структуры и качества, чем числа и количества.

Сделав этот обзор, мы подходим к определению важнейших сторон квалиметрии: первым является *«свойство»*. Необходимо отметить, что МС ИСО 9000:2000 не выделяют отдельного термина «свойство», постулируя, что характеристика – отличительное свойство. Однако привычнее обращаться к понятию «свойство», понимая под ним внешнее проявление внутренней сущности объекта. Поэтому при дальнейшем изложении характеристика и свойство будут считаться синонимами.

Предваряя дальнейшее изложение, необходимо уточнить коренное отличие определений понятия «качество» в МС ИСО 9000 редакций 1994 г. и 2000 г. Приведем определения, даваемые термину «качество», в этих документах.

– ИСО 8420 (1994 г.) – качество – это совокупность свойств (характеристик) объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности.

– ИСО 9000:2000 – качество – степень соответствия присущих характеристик требованиям.

Анализируя эти определения, можно отметить, что определение 1994 г. не вводит никакой количественной меры. Совокупность свойств, удовлетворяющая разные группы потребителей, может быть различной. При этом полезно вспомнить диаграмму Джеффри Мура

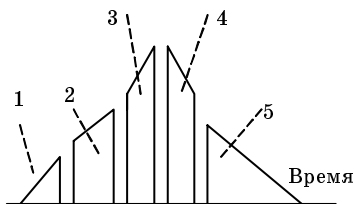


Рис. 1.1. Распределение пристрастий потребителей по времени появления продукции:

- 1 – сторонники нового;
- 2 – ранние приверженцы;
- 3 – раннее большинство;
- 4 – позднее большинство;
- 5 – медлители или отвергающие

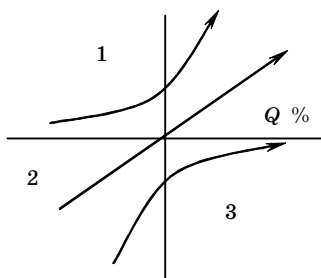


Рис. 1.2. Удовлетворенность потребителей в зависимости от качества продукции:

- 1 – область восхищения;
- 2 – область удовлетворения;
- 3 – область неудовлетворения

для производителя. Эти пристрастия выражаются возрастающей линейной зависимостью по мере улучшения качества.

3. Неудовлетворенность характеристиками продукции, поскольку потребители знают, как должно быть, но этих характеристик у продукции нет.

Обе представленные диаграммы объясняют пристрастия потребителей и дают определенную информацию для принятия решений, не вводя количественную меру.

Определение качества в ИСО 9000:2000 принципиально отличается от рассмотренного подхода тем, что оно дает возможность количественного оценивания через степень соответствия. При малой выборке этой оценкой может являться математическое ожидание, при большей выборке – получение функции распределения.

(Geoffrey Moore. Crossing the Chasm. Harperbusiness. 1991), посвященную степени адаптации различных групп потребителей (рис. 1.1).

Причем между группами по Д. Муру существуют разрывы, свидетельствующие о том, что после каждого момента времени надо предпринимать какие-то усилия, повышающие желание потребителей приобрести именно эту продукцию. Однако полной удовлетворенности всех потребителей достичь не удается.

Примерно тот же смысл имеет диаграмма японского консультанта Нориаки Кано (Noriaki Kano. Attractive Quality and Must-Be Quality // Hinshitsu. № 2. 1994), показанная на рис. 1.2. Эта диаграмма делит характеристики продукции на три области, каждая из которых рассматривает различные предпочтения групп потребителей:

1. Восхищение характеристиками продукции, считая их превосходными и отличающимися в лучшую сторону от продукции конкурентов.

2. Удовлетворение характеристиками продукции, считая их нормой

В связи со сказанным можно заключить, что определение последней версии стандартов полностью применимо для квалиметрических оценок.

Итак, качество любого вида продукции определяется совокупностью характеристик (свойств), через посредство которых мы пытаемся оценить качество. Отметим ряд особенностей свойств.

1. Свойства объекта и моделей, его описывающих, различаются между собой по *качественному* признаку. Так, протяженность объекта отличается от его свойства инертности (способность сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения). Оба они отличаются от цены, внешнего вида и так далее.

2. Объектом познания может быть и само свойство, причем метод его изучения также строится по принципу от грубой модели – к более точной, от простых свойств – к более сложным.

3. Каждое свойство может быть выражено в большей или меньшей степени, т. е. иметь свою оценку, лучше количественную.

Красиво – некрасиво; дешево – дорого; степень нагретости; габаритные размеры и так далее.

4. Любое свойство может рассматриваться лишь в том случае, если оно проявляется. В то же время различные проявления одного и того же свойства необходимо сравнивать между собой. Сравнение единственный способ получения представления о количественной характеристике проводимых либо экспериментально (что не всегда возможно), либо теоретически, что возможно при наличии определенных условий.

5. Получение посредством сравнения информации о количественной характеристике того или иного свойства называется *измерением*. Галилей сформулировал: «Измерять то, что измеримо и стремиться к тому, чтобы стало измеримым то, что им еще не является». Результат измерения – измерительная информация, получаемая только при сравнении проявления одного и того же свойства.

6. Используя измерительную информацию, можно вычислить количественные характеристики таких свойств объектов познания, которые не поддаются измерению (макромир, микромир, прогноз на будущее и так далее).

7. Характеристика свойства определяется *мерой* этого свойства.

Так, например, меры физических измеримых свойств называются физическими величинами (масса, время, длина, телесный или плоский угол, скорость и так далее).

В экономике меры называют экономическими показателями (объем производства, цена, трудозатраты).

В математике мерами свойств законов распределения являются их моменты (числовые характеристики).

В качестве – характеристики качества.

Таким образом, понятие меры – количественной характеристики любого свойства – является общим для материального и идеального мира и служит универсальным инструментом познания.

Продолжая определение важных сторон квалиметрии, переходим к понятию «*потребность*». Стандарт ГОСТ Р ИСО 9000-2001 вводит понятие «*потребитель*», но не дает определения процессу потребления и самому понятию «*потребность*». Дадим определение процессу потребления: «*потребление – использование общественного продукта в процессе удовлетворения потребностей*». Таким образом, процесс потребления является заключительным этапом процесса воспроизводства. Абстрактное рассмотрение свойств и их мер интересно для ученого, но правильней их рассматривать под углом зрения общественной практики, которая включает в себя все виды целенаправленной деятельности людей, направленной на удовлетворение потребностей. Структура потребностей показана на рис. 1.3.

Прокомментируем структуру.

– Многоуровневая, иерархическая структура (рис. 1.3) называется графом или, точнее, иерархическим графом или деревом (что важно для теории квалиметрии).

– Потребности могут быть личные, групповые или общественные. Будем рассматривать только общественные потребности, как интегральное проявление потребностей.

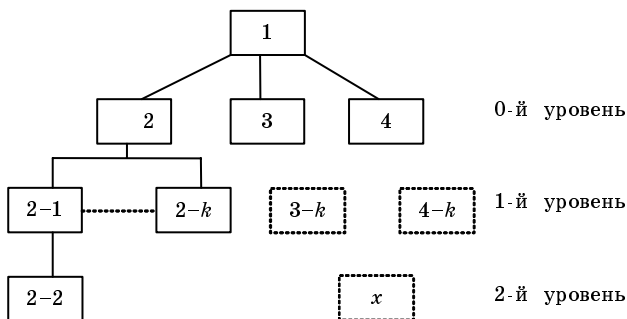


Рис. 1.3. Структура потребностей: 1 – общественные потребности; 2 – материальные потребности (пища, жилье, одежда); 3 – социальные потребности, называемые социальными интересами (свобода перемещения, общение, информированность, образование, право на труд); 4 – духовные потребности, называемые духовными ценностями (наука, искусство, культура, религия)

– Структура (рис. 1.3) – упрощенная идеальная модель; на самом деле потребности, интересы ценности интегрируются, дифференци-

руются, противостоят друг другу, изменяются, т. е. создают размытое множество сфер воздействия [5, 6].

– Схема (рис. 1.3) может детализироваться (прямоугольники, расположенные на уровнях 1,2 и т. д.), на разных уровнях может быть различное число потребностей (прямоугольники, показанные пунктиром). Так, например, одежда может быть рабочей, повседневной, выходной, зависеть от национальных традиций, климатических зон и т. п.

Естественно, что сфера потребления тесным образом связана со сферами производства и творчества.

1.2. Измерение характеристик качества

Для характеристик (показателей) качества можно ввести качественные и количественные характеристики. Показателем различия характеристик является *размерность* – *dimension* – *dim* (в зависимости от контекста можно переводить и как размер, и как размерность).

Если показатели качества могут быть представлены в виде функциональной зависимости от основных и производных величин, то их размерность можно выразить в виде степенного многочлена

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma, \quad (1.1)$$

L, M, T – размерность величин ($T = \dim t; M = \dim m; L = \dim l$); α, β, γ – показатели размерности.

Каждый из показателей может быть положительным, отрицательным, нулем, целым или дробным.

Показатель *безразмерен*, если все показатели размерности равны 0.

Приведем основные положения теории размерности:

1. Размерности правой и левой частей уравнения не могут не совпадать, так как сравниваются только одинаковые свойства. Алгебраически суммироваться могут только показатели качества, имеющие одинаковые размерности.

2. Алгебра размерностей *мультипликативна*, т. е. состоит из одного действия – умножения, при этом:

2.1. Размерность произведения равна произведению размерностей

$$Q = ABC \quad \dim Q = \dim A \cdot \dim B \cdot \dim C. \quad (1.2)$$

2.2. Размерность частного равна отношению их размерностей

$$Q = \frac{A}{B} \quad \dim Q = \frac{\dim A}{\dim B}. \quad (1.3)$$

2.3. Размерность показателя, возведенного в степень, равна его размерности в той же степени

$$Q = A^n \quad \dim Q = \prod_{i=1}^n \dim A = \dim^n A. \quad (1.4)$$

Количественной характеристикой показателей качества является их *размер* (не путать со *значением*, выражением размера в определенных единицах: трудоемкость в нормоднях или минутах, расстояние в километрах или сантиметрах). Число в значении показателя качества называется *числовым значением* (на сколько значение больше нуля, или во сколько больше (меньше) единицы измерения).

Таким образом, значения показателя качества Q определяется числовым значением q и некоторым размером $[Q]$, принятым за единицу,

$$Q = q [Q], \quad (1.5)$$

уменьшение или увеличение $[Q]$ влечет за собой обратно пропорциональное изменение q .

Таким образом, числовые значения показателей качества могут быть *абсолютными* (обладающими размерностью) и *относительными* (безразмерными).

Сделаем важные замечания, которые присущи процессу оценивания характеристик качества продукции:

1. Качество всегда *относительно*, поэтому комплексный абсолютный показатель *безразмерен*, так как он сравнивается с эталоном или базой, имеющим ту же размерность. При этом следует помнить, что качество, эффективность и надежность (в силу вероятностной природы этих показателей) никогда не могут быть больше единицы!

Возможные варианты относительной оценки качества на различных этапах жизненного цикла приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Варианты оценки качества на различных этапах ЖЦ

Цель оценки КП	Базовые показатели(эталон)
Выбор варианта при разработке нового изделия	Техническое задание или условия контракта
Контроль КП при поставке	ГОСТ, технические условия или иная нормативная документация
Анализ динамики текущего производства	Показатели предыдущего периода
Аттестация КП	Эталон (база) или лучший мировой образец

Следует отметить, что приведенные этапы практически охватывают возможные варианты оценок, начиная от разработки нового

изделия, его поставки, контроля в процессе производства и аттестации. Может оказаться, что характеристики оцениваемого изделия превышают характеристики эталона, в этом случае оцениваемое изделие становится эталоном.

2. Основные характеристики могут изменяться на различных этапах существования продукции, например при появлении первых телевизоров их основной характеристикой стала *новизна*, при появлении цветных телевизоров, основной характеристикой стал *престиж*, в настоящее время при развитии телевидения и выравнивании технических характеристик мерилom становится *надежность* и *экономичность*.

3. Характеристики качества изделия имеют тенденцию к уменьшению при неизменности начальных технических характеристик, в связи с появлением новых более совершенных изделий, которые становятся эталоном.

4. В силу разнородности характеристик качества их коэффициенты значимости различны. Однако при этом всегда выполняется условие: сумма коэффициентов значимости всегда равняется единице. Причем это условие соблюдается на всех уровнях иерархии. Так, если коэффициент значимости какого-либо сложного свойства равен 0,5, то коэффициенты значимости более простых свойств в сумме равны 0,5.

Приведем несколько простых примеров получения относительных оценок:

а) коэффициент применяемости $K_{\text{пр}}$

$$K_{\text{пр}} = \frac{n - n_0}{n},$$

n – общее число компонент (типоразмеров) изделия; n_0 – количество оригинальных компонент.

б) относительная себестоимость $C_{\text{о.с}}$

$$C_{\text{о.с}} = \frac{C_{\text{в.р.}}}{C_{\text{т}}},$$

$C_{\text{в.р.}}$ – себестоимость видов работ; $C_{\text{т}}$ – технологическая себестоимость изготовления.

в) относительная трудоемкость эксплуатации $T_{\text{о.т}}$

$$T_{\text{о.т}} = \frac{T_{\text{в.р.}}}{T},$$

$T_{\text{в.р.}}$ – трудоемкость видов работ (монтаж, настройка, транспортирование); T – трудоемкость эксплуатации.

Количественные характеристики показателей качества можно получить путем теоретического или экспериментального сравнения их

размеров между собой. Сравнение теоретическим путем не является *измерением*, поэтому эту информацию нельзя назвать измерительной.

Экспериментальное сравнение служит отличительным признаком измерения и дает измерительную информацию. Однако дальнейшее преобразование и использование этой информации измерением не является.

Не правы те, кто называет процесс измерения, т. е. получение количественных характеристик показателей качества опытным путем – прямым измерением, а переработку измерительной информации – косвенным или совместным. При этом:

во-первых, стирается грань между получением и использованием измерительной информации и между измерениями и вычислениями;

во-вторых, в метрологии существует четкое понимание косвенных измерений, т. е. таких, когда показатель ищется не в прямую. (Пример – измерение мощности в высокочастотном тракте, проверка упругости шарикоподшипников и так далее).

Измерения могут выполняться различными методами:

– *Инструментальные методы*, находящиеся в ведении метрологических служб и лабораторий. Причем метрологическая служба:

а) проводит измерения в интересах процесса существования объекта исследования на различных этапах ЖЦЮ;

б) хранит эталоны измерительных средств и/или общается с их хранителями;

в) проводит проверку инструментальных средств;

г) участвует в процессе аккредитации измерительных лабораторий или центров.

Инструментальные методы, при обязательном указании технического средства контроля, называются техническим контролем. Они могут быть ручными, автоматизированными, автоматическими. Критерием ϕ отнесения технического контроля к одной из указанных групп является отношение времени, затрачиваемого контролером на ручные операции T_p , к общему времени контроля T_c .

$$\phi = T_p / T_c. \quad (1.6)$$

Примерные рекомендации по определению типа контроля даны в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Классификация типов контроля

Тип контроля	Ручной	Полуавтоматический	Автоматический
Критерий ϕ	1–0,5	0,5–0,02	0,02–0

Классификация характеристик типов технического контроля весьма обширна, приведем основные разделы этой классификации:

объем контроля – сплошной 100% или выборочный;

по числу контрольных проверок – однократный или многократный;

по типу контроля – входной, выходной, определительный, операционный, подтверждающий;

по воздействию на производство – активный, пассивный;

по степени ответственности – самоконтроль, проверка мастеров участка, проверка ОТК, проверка внешним аудитом;

по воздействию на объект контроля – разрушающий, не разрушающий;

по глубине – проверка главных параметров, проверка соподчиненных параметров;

по охвату – внешний осмотр, проверка определяющих характеристик, проверка всех характеристик.

Сам процесс и организация технического контроля весьма сложны, описываются методами теории контроля и технического диагностирования и должны рассматриваться в отдельном курсе.

– *Экспертные методы* измерений используются, когда инструментальные средства применить невозможно, сложно или экономически не оправдано (измерение эргономических, эстетических показателей). Количество экспертов зависит от поставленной задачи. При социологических опросах экспертов может быть очень много. Примерами экспертизы могут являться: собрание или съезд, жюри, суд, консилиум, студенческий экзамен. Техническая экспертиза является делом высококвалифицированных профессионалов данной предметной области и требует специальной подготовки, четкого проведения и корректной обработки результатов. Более подробно эти вопросы будут рассмотрены в разд. 4.

– Разновидностью экспертного метода, стоящего особняком, является *органолептическое измерение*. Оно основано на использовании органов чувств человека: зрения, слуха, осязания, обоняния и вкуса. Они применяются в обиходе, пищевой, парфюмерной промышленности, медицине.

– *Комбинаторный метод* измерений сочетает инструментальные и экспертные методы.

– *Автоматизированные экспертные системы и методы имитационного моделирования* являются дальнейшим развитием экспертного оценивания на базе современных информационных технологий. Более подробно эти методы будут рассмотрены в разд. 5 и 6.

1.3. Статистические измерительные шкалы

Любые наблюдаемые явления представляют собой эмпирическое множество фактов, с которыми напрямую иногда не удастся провести никаких операций (макрокосм, микромир и так далее). Тем не менее, при попытке начала операции измерения можно определить существование двух и только двух видов отношений на этом множестве:

Первый вид: эквивалентность – J .

Второй вид: предпочтение – II .

Для возможности измерений, чем занимается теория планирования эксперимента, необходимо перейти к числовому множеству, отражающему эмпирическое множество в виде чисел и отношений в числовом множестве, тогда эквивалентности в эмпирическом множестве будет соответствовать равенство или тождество в числовом множестве; а предпочтению в эмпирическом множестве – отношения больше или меньше в числовом.

Таким образом, мы имеем два множества: эмпирическое – \mathcal{E} , с отношениями на нем и числовое – N , с отношениями на нем. Причем, каждому элементу эмпирического множества \mathcal{E}_i ($i = 1, \dots, N$) соответствует элемент числового множества \mathcal{C}_i ($i = 1, \dots, N$).

Теперь необходимо найти функцию $f(x)$: –гомоморфную, работающую в одном направлении, или изоморфную, работающую в обоих направлениях, переводящую члены одного множества в другое.

Таким образом, упорядоченное статистическое множество (кортеж), состоящее из трех членов: эмпирического множества \mathcal{E} , числового множества N , функции $f(x)$ называется *статистической измерительной шкалой*. В квалиметрии этот кортеж носит название *квалиметрической или измерительной шкалы*.

Примерное представление об элементах статистической измерительной шкалы показано на рис. 1.4.

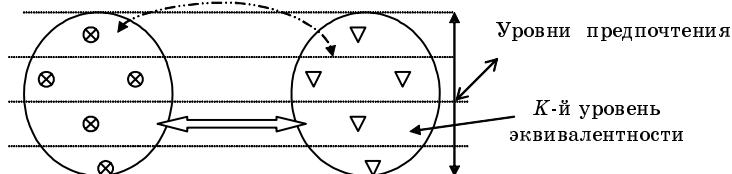


Рис. 1.4. Представление о статистической шкале: \otimes – эмпирические факты; ∇ – числовые значения; \leftrightarrow – функция преобразования; \dashrightarrow – статистическая шкала

Следует отметить, что привычная всем шкала любого измерительного прибора не является статистической измерительной шкалой, а представляет собой числовое отображение функции $f(x)$.

Мир шкал велик, существуют различные классы шкал, в том числе и многомерные шкалы, шкалы для различных топологических пространств и структур, рассмотрение которых не входит в круг задач пособия.

Далее рассмотрим основные виды шкал, применяемых в стандартных измерениях. Единственное, что нужно понять и запомнить: *любое измерение осуществляется в какой-либо шкале!* При этом выбор шкалы влияет на правильность измерений.

Так же, как выпуск денежной массы, не обеспеченной товарами, приводит к инфляции и последующей девальвации денежной единицы, так же и неверный выбор шкалы обесценивает процесс измерения в ходе эксперимента.

Шкала эквивалентности

Шкала эквивалентности (ШЭ) в разных литературных источниках может носить разное название, имея при этом одинаковый смысл: шкала – номинальная, порядка, эквивалентности, классификационная, наименований (два последних названия представляются не корректными, что будет видно из дальнейшего изложения), толерантная.

Разберемся с логической основой шкалы эквивалентности. Пусть проводится такое измерение, когда каждому объекту может быть приписано любое значение, но обязательно каждому несхожему объекту свое конкретное значение, что соответствует использованию любой монотонной функции. Набор объектов, имеющих одинаковые значения, приводит к шкале эквивалентности. Например, при выпуске продукции часть ее бракуется, образуя подмножество T , эквивалентное в заданном нами смысле, где $t_1, t_2, \dots \in T$. Виды брака могут быть разными, но они едины с позиций контролера. Подобная ситуация показана на рис. 1.5. На рисунке для наглядности и возможности сравнения приведены все типы рассматриваемых в пособии шкал.

Шкала эквивалентности может быть разделена на две подшкалы:

а) *подшкала наименований* – все полученное подмножество T , со свойственными ему аксиомами:

1. Если $t \in T$, а $t J t$, то получаем свойство изоморфности, когда любой элемент равен сам себе.

2. Если $t_1, t_2 \in T$, а $t_1 J t_2$, то и $t_2 J t_1$, то получаем свойство симметрии.

3. Если $t_1, t_2, t_3 \in T$, а $t_1 J t_2$ и $t_2 J t_3$, то $t_1 J t_3$, то получаем известное из школьной математики свойство транзитивности – когда два элемента порознь равны третьему, то они равны между собой.

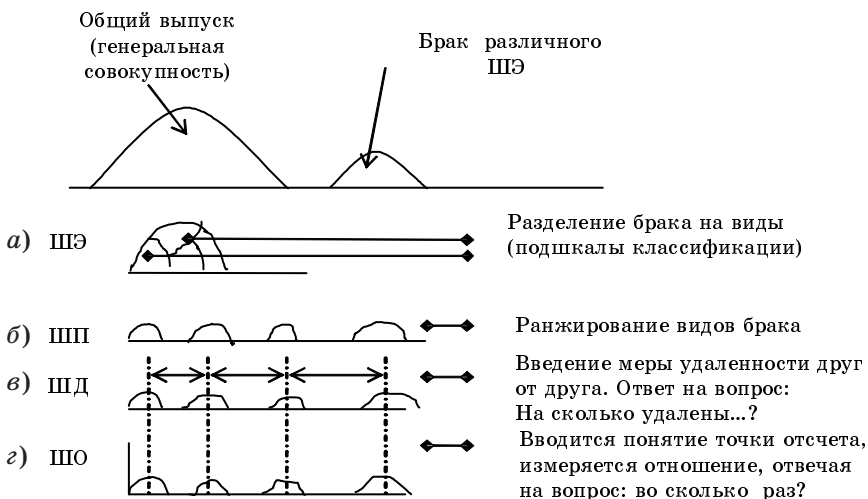


Рис. 1.5. Смысл статистических шкал: а – шкала эквивалентности; б – шкала предпочтения; в – шкала дистанций; г – шкала отношений

б) *подшкала классификаций*. Разделим T (полученное подмножество) на классификационный показатель J , частное T/J создает непересекающиеся области в T , имеющие одинаковый показатель эквивалентности.

Подмножество брака – T (рис. 1.5, а), может содержать разные виды брака. Например, при контроле качества на телевизионном производстве это может быть: скол на фанеровке, несведенные лучи, трещина на кинескопе и т. п. Все эти дефекты эквивалентны по одному признаку – невозможности поставки в торговую сеть из-за обнаруженных несоответствий ТУ. Второй пример, участники первенства премьер-лиги России по футболу (в начале сезона) разделены на команды, имеющие разные цвета на футболках, но их объединяет единый признак эквивалентности – участие в первенстве России.

Логiku измерений по шкале эквивалентности можно отразить следующим образом:

$$Q_i = Q_3 \text{ или } Q_i \neq Q_3, \quad (1.7)$$

где Q_i – характеристика измеряемого объекта; Q_3 – требования ТУ или иных документов.

Отметим, что подмножество T не вводит никаких числовых значений и не определяется никакими параметрами. Поэтому ШЭ относится к разряду непараметрических шкал.

Шкала предпочтения

Шкала предпочтения (ШП) (рис. 1.5, б) также имеет разные названия, сохраняя единый смысл (шкала порядка, рангов, предпочтений). При измерениях по этой шкале используется главный принцип квалиметрии – принцип попарного сопоставления.

Логику измерений по шкале предпочтения можно записать в виде:

$$Q_i < \text{или} > Q_j, \quad (1.8)$$

где Q_i – характеристика измеряемого объекта; Q_j – характеристика другого объекта из сравниваемого подмножества $j = 1, 2, \dots, n$.

Полученное подмножество T можно расположить по оси качества либо по признаку возрастающего предпочтения $Q_1 > Q_2 > Q_3 \dots$, либо по признаку убывающего предпочтения $Q_1 < Q_2 < Q_3 \dots$. Выбор порядка предпочтения зависит от целей исследования.

В нашем примере с телевизионным контролем за признак предпочтения можно выбрать простоту устранения дефекта, создав ряд: устранение скола фанеровки, сведение лучей, замена кинескопа. При выборе из ряда аналогичных приборов, для установки одного из них на борт самолета, можно избежать точного определения веса, просто попарно сопоставляя приборы на рычажных весах. И когда масса m_i какого-то из них оказывается меньшей, то, естественно, что именно он будет выбран для летательного аппарата. Напомним, что количество топлива увеличивается в пропорции 10 литров на 1 кг аппаратуры для самолета и 100 литров на 1 кг для ракеты.

Аксиоматика шкал предпочтения усложняется незначительно.

1. Если $t_1, t_2 \in T$, а $t_1 J t_2$, то либо $t_1 \Pi t_2$, либо $t_2 \Pi t_1$ и тогда получаем свойство связности.

2. Если $t_1, t_2 \in T$, а $t_1 \Pi t_2$, то $t_2 \not\propto t_1$ и тогда получаем свойство асимметрии.

3. Если $t_1, t_2, t_3 \in T$, а $t_1 \Pi t_2$ и при этом $t_2 \Pi t_3$, то $t_1 \Pi t_3$ и тогда получается известное уже свойство транзитивности.

Расстановка объектов в порядке убывания или возрастания их показателей называется *ранжированием* и при этой процедуре используется, как было отмечено, принцип попарного сопоставления. Психологи утверждают, что такой принцип лежит в основе любого выбора, т. е. сравнивать размеры попарно всегда проще, чем сразу определить их место на шкале предпочтения.

Пример. Необходимо определить результаты оценивания трех образцов продукции тремя экспертами при условии, что 1 оценивает предпочтение, а 0 означает, что характеристики образца хуже. Результаты сведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Пример ранжирования

$i \backslash j$	1	2	3	Σ
1	–	1	0	1
2	0	–	0	0
3	1	1	–	2

Результат оценки

$$Q_3 > Q_1 > Q_2.$$

Для облегчения измерения по шкале предпочтения (порядка) некоторые точки на ней можно закрепить в качестве опорных (*реперных*). Студенческие знания оцениваются по этой шкале, а сами цифры носят название *баллов*.

В качестве примеров рассмотрим таблицу интенсивности землетрясений по 12-балльной шкале MSK – 64 (не путать с 7-балльной шкалой Рихтера) – табл. 1.4 и 10-балльную таблицу твердости минералов по шкале Роквелла – табл. 1.5.

Таблица 1.4

Интенсивность землетрясений

Балл	Название землетрясения	Характеристика
1	Незаметное	Только приборы
2	Очень слабое	Некоторые люди в состоянии покоя
3	Слабое	Небольшая часть населения
4	Умеренное	Дребезжание стекол, скрип дверей и стен
5	Довольно сильное	Сотрясение зданий, трещины стекол и штукатурки
6	Сильное	Ощущается всеми, предметы падают со стен и мебели, легкое повреждение зданий
7	Очень сильное	Трещины в домах, разрушение легких построек
8	Разрушительное	Трещины на земле, памятники двигаются, дома повреждаются
9	Опустошительное	Разрушение домов
10	Уничтожающее	Крупные трещины в почве, оползни и обвалы, разрушение зданий, искривление рельсов
11	Катастрофа	Полное разрушение зданий, широкие трещины
12	Сильная катастрофа	Изменение русла рек, водопады, ни одно здание не выдерживает

Шкала твердости минералов

Балл	Твердость
0	Меньше твердости талька
1	Больше твердости талька, но меньше твердости гипса
2	Больше твердости гипса, но меньше известкового шпата
3	Больше известкового шпата, но меньше плавикового шпата
4	Больше твердости плавикового шпата, но меньше апатита
5	Больше твердости апатита, но меньше полевого шпата
6	Больше твердости полевого шпата, но меньше кварца
7	Больше твердости кварца, но меньше твердости топаза
8	Больше твердости топаза, но меньше твердости корунда
9	Больше твердости корунда, но меньше твердости алмаза
10	Равен твердости алмаза или больше

По шкале предпочтения сравниваются размеры, которые сами остаются *неизвестными*. Ранжированный ряд может быть получен в результате опытов, расчетов или их комбинации, в результате сравнения принимается решение: какой размер больше, меньше или равен. При использовании корректной модели – решение *правильно*. Например, при сравнении площади круга и вписанного и описанного треугольников.

В отличие от теоретического сравнения экспериментальное сравнение является случайным, т. е. решение может быть правильным или неправильным. На правильность решения оказывает влияние наличие помех. Отметим, что помехи могут быть как аддитивными, так и мультипликативными. Помеха измерению является предметом самостоятельного изучения, большинство измерений связано с введением *поправки*, корректирующей ошибку, вызванную помехой.

При использовании шкал предпочтения введение поправки бессмысленно, так как эта шкала определяет только логические операции, при этом отсутствует масштаб и не могут выполняться никакие арифметические действия. Баллы нельзя складывать, вычитать, перемножать или делить. Поэтому, несмотря на малую информативность шкал предпочтения, они, тем не менее, находят широкое применение при оценках в трудно формализуемых областях: в социальной сфере, искусстве, гуманитарных науках, при органолептических экспертизах, при визуальном контроле и т. д.

Структурная схема средства измерения по шкале предпочтений (рис. 1.6) состоит из компаратора (устройства сравнения) и решате-

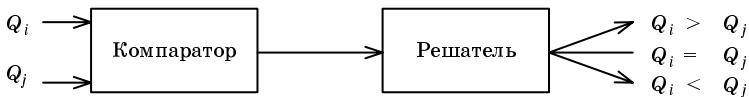


Рис. 1.6. Средство измерения

ля (устройства принятия решения). Чаще всего в роли компаратора при оценивании по шкале предпочтений выступает человек. При автоматизации процесса это может быть ЭВМ.

Шкала предпочтений является вторым представителем непараметрических шкал. В шкале не проводится действий между несколькими объектами одновременно, а рассматриваются только парные соответствия.

Шкала дистанций

Шкала дистанций (ШД), как и две предыдущие, имеет разные названия в разных литературных источниках при сохранении единой логики. Она носит название шкалы дистанций, разности, интервалов. Шкала (рис. 1.5, в) позволяет определять разность между размерами, которые сами остаются неизвестными, так как в шкале не вводится понятие начала отсчета. В шкале вводятся соотношения между несколькими объектами, поэтому аксиоматика этих шкал достаточно сложна и не будет рассматриваться в пособии. Единственное, что нужно отметить, что оператор Δ , обозначающий величину дистанции, в записи $t_1 t_2 \Delta t_3 t_4$ указывает, что разность $t_1 - t_2$ предпочтительнее, чем $t_3 - t_4$.

Модель теоретического сравнения размеров одной меры представлены в виде

$$Q_i - Q_j = \Delta Q_{ij}. \quad (1.9)$$

При этом с размером Q_j сравниваются все размеры Q_i . Представим, что имеется ранжированный ряд $Q_5 > Q_4 > Q_3 > Q_2 > Q_1$, порядок появления измерений не имеет значений, так как всегда их можно перенумеровать в порядке возрастания или убывания. На рис. 1.7 представлен набор пяти дистанций, в качестве нулевого Q_j выбран 3-й размер, если бы мы выбрали Q_4 , произошло бы смещение нуля вправо. Таким образом, точка нуля выбирается произвольно. Следовательно, разность между дистанциями (интервал) может принимать как отрицательные, так и положительные значения. Само понимание начала отсчета произвольно и полностью зависит от желания исследователя или постановки задачи.

Приведем несколько примеров шкалы дистанций.

1. Необходимо измерить высоту здания от основания фундамента. При этом, совершенно не важно от какого уровня вести отсчет, от уровня моря или от той отметки по высоте, на которой находится здание.

1. Расстояние по окружности между противоположными концами диаметра не зависит от начала отсчета.

2. Перепад температур не зависит от выбора разных температурных шкал:

Цельсия 100° – (между таянием льда и кипением),

Реомюра 80° ;

Фаренгейта 180° ;

Кельвина – 0 отсчета равен $-273,16^\circ$.

Деление шкалы интервалов на равные части – *градации*, устанавливает на ней масштаб и позволяет выразить измерение в числовой мере, т. е. мы измеряем число градаций, укладываемых в интервале ΔQ_j . Для удобства измерений и повышения точности можно использовать различные градации:

- равномерная градация на основе арифметической прогрессии, когда диапазон измерений невелик;

- градация на основе геометрической прогрессии, с целью укрупнения масштаба удаленных измерений;

- градация на основе логарифмической шкалы при большом диапазоне значений и возможности линеаризации характеристик и применения принципа аддитивности;

- градации на основе вероятностных законов распределения;

- градация на основе комбинации различных СИ;

- градация на основе ряда предпочтительных чисел. В связи с важностью указанной градации, ей посвящен подразд. 1.4.

На шкале интервалов определены такие действия как сложение и вычитание, т. е. можно определить, на сколько один размер отличается от другого. Так, на рис. 1.7:

$$Q_5 - Q_4 = \Delta Q_5 - \Delta Q_4,$$

$$Q_5 - Q_2 = \Delta Q_5 - (-\Delta Q_2).$$

Поскольку начало отсчета неопределенно, умножение и деление на шкале интервалов не производится.

Структурная схема средства измерения показана на рис. 1.8.

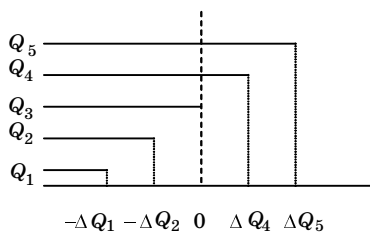


Рис. 1.7. Пример построения шкалы дистанций



Рис. 1.8. Средство измерения

В устройстве сравнения осуществляется операция (1.9)

$$Q_i - Q_j = \Delta Q_{ij}.$$

Компаратор выполняет те же функции, что и в шкале предпочтений, отличие состоит в том, что дистанция Q_j , с которой производится сравнение, устанавливается один раз. Отсчетное устройство служит для определения разности между измеряемым объектом и базовым размером Q_j . Главным элементом отсчетного устройства является градуированная шкала, осуществляющая преобразование $\Delta Q_{ij} \rightarrow \Delta Q_{igr}$. Деление на шкале называется *градуировкой*. При реальных измерениях на объект воздействует много факторов, учет их совместного воздействия невозможен, поэтому появляется случайное слагаемое. Пусть измеряем разницу веса $\Delta m = m_1 - m_2$, но на самом деле $m_1 - m_2 = \Delta m - M$, правая часть должна быть преобразована отсчетным устройством в масштаб принятой градуировки. Но так как в самом преобразовании могут быть ошибки, то получим $X = \Delta m - M - H$, где X – отдельно взятое показание средства измерения, называемое *отсчетом* – x по шкале интервалов, а H – аддитивно взятое случайное слагаемое, характеризующее ошибку измерения.

Если удастся получить представление о законах распределения M и H или оценить их средние значения, тогда в показание средства измерений вносится поправка $\Theta = \bar{M} + \bar{H}$. Поскольку поправка не является случайной, она задает смещение $\Delta m = x + \Theta$ (показание + поправка). Поправка может быть положительной (например, когда часы отстают) или отрицательной (часы спешат).

В общем случае внесение в показание x поправки Θ обеспечивает правильность результата измерений. Достаточно вспомнить соотношение между понятием категоричности и надежности статистических оценок. Результат измерений при этом остается случайным, и мы никогда не получим точечного категорического ответа, а всегда получим доверительный интервал, в котором будут находиться значения. На основании объема выборки n и заданного уровня значимости α (см. Прил. ПЗ) определяются верхняя и нижняя границы доверительного интервала.

Шкала отношений

Шкала отношений (ШО) также имеют различные названия – шкала пропорциональности, подобия, отношений, но чаще всего в литературе применяется последнее название. В ШО (рис. 1.5, з) полагают, что неизвестный размер сравнивается с известным размером и выражается через него в кратном или дольном отношении. В ШО вводится понятие начала отсчета – нулевая точка. Измерения по шкале отношений отвечают на вопрос «во сколько раз больше?» и поэтому позволяют осуществлять все возможные арифметические действия. Шкала отношений не имеет отрицательных значений и лежит в диапазоне от 0 до ∞ .

При сравнении двух размеров по ШО следуют отношению

$$Q_i / Q_j = q_{ij} \quad (1.10)$$

Размер Q_j , стоящий в знаменателе, выступает в качестве единицы измерения, поскольку частное от деления q_{ij} показывает в размере Q_i . Для обеспечения единства измерений в качестве Q_j выбирается узаконенная единица $[Q]$, т. е. $Q_i / [Q] = q$.

Пример. Вес товара (нетто) $m_m = 320$ г, вес упаковки $m_y = 40$ г, вес брутто $m_b = 320 + 40 = 360$ г. Можно найти отношение $m_m / m_y = 320 / 40 = 8$ раз.

Заметим, что ШО является частным случаем ШИ при фиксации $Q_j = 0$. Следовательно, теоретическая модель $Q_i / [Q] = q$ позволяет пользоваться той же структурной схемой, что и для ШИ $Q_i - Q_j / [Q] = \Delta Q$, т. е. последовательность операций такова.

Вначале определяется интервал с помощью устройства сравнения, а затем числовое значение с помощью отсчетного устройства.

Все сказанное о помехах применимо и для ШО, т. е. поправка также суммируется или вычитается из измерения

$$Q = X \pm \Theta.$$

Пример. Точность рулетки 0,1%, измеряется длина комнаты 500 см, длина рулетки 10 м. Ошибка при измерении составит величину $\Theta = 1000 \text{ см} \cdot 0,001 = 1 \text{ см}$, и тогда с учетом поправки измерения будут лежать в диапазоне – 559 ÷ 561 см.

Из этого примера очевидно, что на результат измерения влияет *точность* средства измерения. Если в ШО за начало отсчета принять абсолютное значение нуля (абсолютная температура, абсолютно чер-

ное тело, абсолютное поглощение электромагнитного излучения, скорость света и т.п.), то осуществляется переход к абсолютной шкале. Некоторые авторы выделяют этот тип шкал в отдельный класс. В данном пособии будем использовать только 4 типа рассмотренных

Таблица 1.6

Сравнение статистических измерительных шкал

Наименование	Введение параметра	Виды статистик	Вид функции $f(x)$	Примеры
ШЭ – признак эквивалентности	Не параметрические, возможны логические операции	Выборка	Любая однозначная	Брак продукции, участники конкурса
ШП – признак предпочтения		Ранжирование	Любая монотонная	Группы брака, цвета команд, баллы, звания
ШИ – признак отстояния	Параметрические, допустимы числовые оценки	Гистограмма, мода, размах	Любая линейная	Температура, даты, расстояния
ШО – признак отношения		Закон распределения	Любая функция подобия	Доход, время, физические величины

СШ (табл. 1.6). Практика использования шкал требует определенного навыка исследователя. Так, например, совершенно не обязательно при оценивании стремиться к использованию самой универсальной шкалы отношений. Применение более мощных шкал приводит к удорожанию эксперимента, а порой и к увеличению времени. Порой при принятии решений достаточно использовать шкалу предпочтений.

1.4. Ряды предпочтительных чисел

Большим достижением системы мировой стандартизации явилось введение в 30-е гг. XX в. идеи параметрических рядов. К этому времени в промышленности появилось огромное количество видов, типов и типоразмеров различных устройств, поскольку каждый потребитель заказывал, требующиеся именно ему изделия. Выход из кошмара создания разнородной и увеличивающейся по объему продукции был найден за счет нормализации параметров выходных характеристик изделия. Поясним это простым примером (рис. 1.9). На рисунке представлена плоскость двух параметров X_1 и X_2 , разделенная на заданные градации (в данном случае равномерные). Изделие можно было создавать только с параметрами, находящимися в пере-

крестии координатной сетки. Параметры внутри квадратов являлись запрещенными. Такое, на первый взгляд, простое решение привело к сокращению типов и типоразмеров на порядок и дало огромную экономию. Дальнейшее развитие законодательной стандартизации (обязательность, которой установлена постановлением правительства СССР за №1211 от 9 июля 1940 г.), шло по пути выбора рациональных градаций применяемых шкал. Основой для рациональной градации послужила идея *предпочтительных чисел*. Использование предпочтительных чисел согласует параметры и размеры разных видов продукции, выпускаемых мировым сообществом, обеспечивает взаимозаменяемость, способствует использованию информационных технологий на разных этапах жизненного цикла.

Предпочтительным числам свойственны математические закономерности [15]]. При определении членов арифметической прогрессии, когда разность между последующим числом (членом арифметической прогрессии) и предыдущим числом одинакова, применяется следующее выражение:

$$a_n = a_1 + d(n - 1), \quad (1.11)$$

где a_1 – первый член прогрессии; a_n – последний член прогрессии; d – показатель прогрессии; n – число членов прогрессии. Прогрессия может быть возрастающей и убывающей с любым значением показателя. Достоинством такого ряда является простота, а большим недостатком неравномерность отличия. Так, приняв показатель прогрессии равным +2, получим ряд чисел: 2, 4, 6, 8, 10, ..., тогда второй член отличается от первого на 100%, а пятый больше четвертого всего на 25% и т. д. Для исключения этого недостатка переходят к ступенчатости арифметической прогрессии, что хорошо иллюстрируется номиналами денежных монет и купюр. На основе этих рядов построено очень небольшое число стандартов (подшипники качения, размеры обуви).

Гораздо большее, распространение получили ряды чисел, построенные на основе геометрической прогрессии. Для определения значения членов этой прогрессии используется следующее выражение:

$$a_n = a_1 q^{n-1}, \quad (1.12)$$

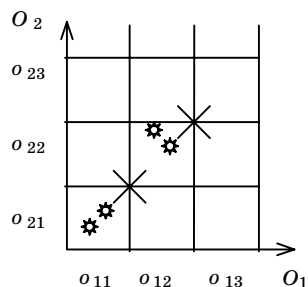


Рис. 1.9. Иллюстрация идеи параметрических рядов:
⚙️ – запрещенные параметры;
✖️ – разрешенные параметры

где a_1 – первый член прогрессии; a_n – последний член прогрессии; d – знаменатель прогрессии; n – число членов прогрессии.

Рассмотрим некоторые свойства геометрической прогрессии, полезные для задач квалиметрии.

1. Относительная разность между соседними членами ряда всегда постоянна, например ряд 3, 9, 27, 81, 243, ... имеет отношение между соседними членами 300%.

2. Произведение или частное любых членов прогрессии является членом той же прогрессии. Поэтому, если линейные размеры представляют собой ряд предпочтительных чисел, то площади и объемы также будут членами этого ряда.

История применения предпочтительных чисел восходит еще к древнему Риму, но связывают их с именем военного инженера Шарля Ренара. В 1877 г. он разработал спецификацию на канаты воздушных шаров, предложенный им ряд предусматривал десятикратное увеличение каждого пятого члена прогрессии по правилу $q = \sqrt[5]{10}$. В 1953 г. ИСО в лице своего комитета ИСО/ТК 10 «Предпочтительные числа» принял международные рекомендации Р ИСО 497 по предпочтительным числам, послужившие основой для разработки параметрических стандартов в большинстве стран мира. В указанных рекомендациях предложено шесть рядов предпочтительных чисел, именованных $R5, R10, R20, R40, R60, R80$ (табл. 1.7). Числа этих рядов составлены по правилу $a_n = aq^n = 10a, q = \sqrt[n]{10}$. В 1985 в СССР был принят ГОСТ 8032-84, который в настоящее время действителен и в России.

Таблица 1.7

Ряды предпочтительных чисел

Наименование ряда	Употребимость	Знаменатель $\sqrt[n]{10}$	Число членов ряда от 1 до 10	Разность, %
$R5$	Рекомендовано	$1,5849 \approx 1,6$	5	60
$R10$	Рекомендовано	$1,2589 \approx 1,25$	10	25
$R20$	Рекомендовано	1,12	20	12
$R40$	Рекомендовано	$1,0593 \approx 1,06$	40	6
$R80$	По согласованию	$1,0292 \approx 1,03$	80	3
$R160$	По согласованию	$1,015 \approx 1,02$	160	1,5

Ряды предпочтительных чисел обладают следующими, важными для практического применения, свойствами:

– представляют удобную систему градаций, применимую в различных сферах использования продукции,

– позволяют выстраивать бесконечные ряды параметров, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения,

– позволяют включать единицу и десятикратные значения любого члена.

В качестве примера рассмотрим ряд $R5$ от 0,1 до 100

0,1; 0,16; 0,25; 0,40,63 – 1; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3 – 10; 16; 25; 40; 63; –100;....

Переход к ряду с большим номером увеличивает число градаций в рассматриваемом интервале (табл.1.8). Сам номер члена ряда представляет собой логарифм предпочтительного числа a при основании логарифма, равном знаменателю прогрессии q : $N = \log_q a$, учитывая это обстоятельство, вместо умножения или деления предпочтительных чисел можно складывать или вычитать номера этих чисел. Приведем фрагмент сравнительной таблицы (табл. 1.8) первых четырех рядов Ренара.

Таблица 1.8

Сравнение предпочтительных рядов

Ряды предпочтительных чисел							
R5		R10		R20		R40	
Номера	Значения	Номера	Значения	Номера	Значения	Номера	Значения
0	1	0	1	0	1	0	1
				1	1,12	1	1,06
				2	1,25	2	1,12
		1	1,25	3	1,4	3	1,18
				4	1,6	4	1,25
				5	1,8	5	1,32
				6	2,0	6	1,4
				7	2,24	7	1,5
1	1,6	2	1,6	8	2,5	8	1,6
				9	2,7	9	1,7
				10	3,0	10	1,8
		3	2,0	11	3,3	11	1,9
				12	3,6	12	2,0
				13	4,0	13	2,12
				14	4,5	14	2,24
				15	5,0	15	2,36
2	2,5	4	2,5	16	5,6	16	2,5

Затененные числа показывают совпадение градаций для всех рядов. При необходимости умножить 1,32 (№5 в *R40*) на 1,8 (№10 в *R40*) достаточно сложить их номера и напротив № 15 прочесть ответ.

При желании заказчика или изготовителя можно использовать не бесконечные ряды, а вводить какие-либо ограничения, например:

– *R10(12...28)* – основной ряд *R10*, ограниченный снизу членом 12, а сверху членом 28,

– *R20(...14)* – основной ряд *R20*, ограниченный сверху членом 14,

– *R5 (2,5...)* – основной ряд *R5*, начинающийся со значения 2,5.

Могут применяться производные ряды, ряды с округлением значений, сдвинутые и ступенчатые ряды и т. д.

Таблица 1.9

Ряды предпочтительных чисел *E*

Наименование ряда	Употребимость	Знаменатель	Число членов ряда от 1 до 10	Разность, %
<i>E3</i>	Рекомендовано	2,2	3	220
<i>E6</i>	Рекомендовано	1,5	6	50
<i>E12</i>	Рекомендовано	1,2	12	20
<i>E24</i>	Рекомендовано	1,1	24	10
<i>E48</i>	По согласованию	1,046	48	4,5
<i>E96</i>	По согласованию	1,02	96	2,0
<i>E192</i>	По согласованию	1,01	192	1,0

Наряду с рядами предпочтительных чисел Ренара, Международная электротехническая комиссия, являющаяся главным органом по международной стандартизации в области радиоэлектроники и электротехники, использует ряды предпочтительных чисел, построенных на числах *E*. Эти ряды *E3, E6, E12, E24, E48, E96, E192* – также построены на базе геометрической прогрессии с показателями, сведенными в табл. 1.9.

В рядах *E* дается только один десятичный знак после запятой, а следовательно, отличие от рядов Ренара составляет несколько процентов. Тем не менее, существование двух гостированных рядов предпочтительных чисел не служит делу интеграции различных отраслей мировой промышленности.

В последние годы эти две международные организации налаживают деловые контакты, существует уже ряд международных стандартов с названием ИСО/МЭК. Поэтому можно рассчитывать на объеди-

нение и рядов предпочтительных чисел. Тем не менее, такое объединение в силу огромного числа технических и технологических сложностей вряд ли произойдет в ближайшем будущем.

2. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ

2.1. Предпосылки к проведению квалиметрических оценок

Решение проблемы рационального построения исследуемой системы, в том числе и на базе квалиметрических оценок, является сложной, многоэтапной и многокритериальной задачей. Многие авторы занимались и продолжают заниматься решением отдельных аспектов этой проблемы. В принципе для решения оптимальной задачи необходимо иметь неограниченные ресурсы (рис. 2.1).

При этом можно решать двуединую задачу оптимизации:

– либо максимизировать значения выходных характеристик, либо, сохраняя выходные значения на заданном уровне, минимизировать ресурсы.

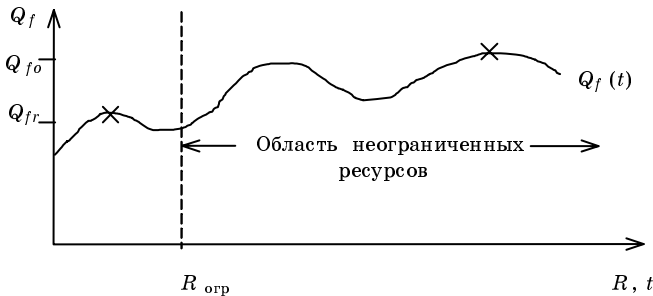


Рис. 2.1. Зависимость выходной характеристики от ресурсов: Q_f – значения выходной функции; Q_{fo} – оптимальное значение выходной функции при неограниченных ресурсах; Q_{fr} – рациональное значение выходной функции при ограниченных ресурсах $R_{огр}$

Чаще всего, на практике невозможно располагать неограниченными ресурсами и приходится решать задачу максимизации выходных характеристик системы при ограниченных ресурсах R . Такие решения некорректно называть оптимальными. Поэтому, имея ограниченные ресурсы, правильнее говорить о рациональных или субоптимальных решениях, которые и будем рассматривать. Для выбранных решений можно применить *метод бенчмаркинга*. Под методом бенчмаркинга понимается процесс сравнительного анализа разных

(чаще всего двух) концепций, компонентов, подсистем, процессов. Цель бенчмаркинга количественно оценить самый лучший вариант среди рассмотренных альтернатив. В основе любого сравнения лежит принцип попарного сопоставления, поэтому подчеркнем, что альтернатив две, худшая – отвергается, а лучшая – сравнивается со следующей и т. д. Наконец, выбрав рациональный вариант, можно пытаться улучшать уже именно его за счет специальных методов проектирования. На улучшение какого-либо параметра расходуется определенный ресурс, при большом числе параметров чаще всего выбирают методiku, основанную на методах теории планирования эксперимента или робастного проектирования. При этом меняют какой-либо параметр до исчерпания ресурса – R или до физически допустимого предела изменения этого параметра при неизменных других. Каждому варианту сопоставляется значение выходного параметра. Назовем эту вектор-характеристику – качеством целевого функционирования Q_f [5–7], тогда возрастание Q_f отвечает цели проектирования. Если проводить сравнение двух альтернатив, то альтернатива Q_f^1 доминирует над альтернативой Q_f^2 , если превышено значение хотя бы по одному параметру Q_f . Отношений доминирования Θ может быть несколько типов:

- Отношение Слейтера (строгое доминирование). Когда $Q_{f\Theta} R$ выполняется тогда и только тогда, когда $Q_f^i > Q_f^j$ при всех значениях $i, j = 1, 2, \dots, n$.

- Отношение Парето. Когда $Q_{f\Theta} R$ выполняется тогда и только тогда, когда $Q_f^i \geq Q_f^j$ при всех значениях $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Чаще всего используют отношение Парето, очевидно, что изменение разных параметров никогда не приведет вектор Q_f в одну точку пространства, в котором в результате многих попыток образуется множество субоптимальных точек, составляющих Парето-оптимальное множество. Попадание в это множество позволяет проводить дальнейшее отыскание рационального варианта.

В итоге вся деятельность по менеджменту качества заключается в оптимизации результата деятельности.

Сложность оптимизационных задач весьма велика и поэтому приходится использовать компьютеры. Необходимо различать позиции математиков, участвующих в процессе решения субоптимальных задач. Чистые математики следуют принципу: «то, что можно, делать как нужно». Прикладные математики утверждают: «то, что нужно, сделать как можно», т. е. смысл решений не в нагромождении искусных вычислительных приемов, а в умении получать нетривиальные результаты путем размышлений и инженерного искусства, поддержанного мощью современных ЭВМ.

В теории качества и квалиметрии широко используются методы теории массового обслуживания, математической статистики и теории вероятностей. Уже установлена важность получения измерительной информации. Теперь отметим, что решения приходится принимать зачастую в условиях неопределенности. И путь принятия решений лежит от неопределенности \rightarrow через риск \rightarrow к определенности.

При любом измерении: первым шагом является определение случайной переменной и пространства выборок.

Пример. Бросание 3 правильных монет. Пространство измерений лежит в интервале $[0, 1]$ и характеризуется дискретным распределением. При этом для каждой монеты в каждом бросании возможен один из исходов: выпадение герба – Г или решетки – Р. Тогда совместное событие выпадения трех монет может быть определено дискретной частотой:

Событие	ГГГ	ГГР	ГРР	РРР
Частота	1/8	3/8	3/8	1/8

Решение задачи выбора переменной и пространства, в котором она находится, является одной из главных задач квалиметрических оценок.

Вторым шагом является определение уровня неопределенности события, имеющего отношение к оценке. Под уровнем *неопределенности* будем понимать показатель, характеризующий оставшуюся неопределенность, после того как вся существующая информация принята во внимание.

Рассмотрим подробнее этот вопрос. Уровень неопределенности выражается вероятностью, приписываемой исходам события. Неопределенность представляет собой информационную энтропию [5]. По формуле Шеннона уровень неопределенности U с n дискретными исходами, каждый с вероятностью p_i определяются:

$$U = -\sum_{i=1}^n p_i \lg p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.1)$$

При n исходах U – max при $p_i = 1/n$, $U = \lg n$.

Неопределенность имеет место тогда, когда нужно произвести выбор объекта из совокупности и существует несколько исходов такого выбора, при этом U оценивается отношением, обратным вероятности. Установим связь между информацией и неопределенностью. Единицей измерения U является бит, причем новая информация о событии может порой снизить, а порой повысить уровень неопределенности. Пусть вероятность события равна p , а ве-

роятность обратного события $q = 1 - p$, предположим что $p = q = 1/2$, тогда $U = \max = 1$ бит. Такая ситуация показана на рис. 2.2.

Далее в тексте будем придерживаться оценок информационной энтропии по Шеннону. Иллюстрация снятия неопределенности дана на рис. 2.3. Когда исход определен, то $U_0 = 0$, при этом полагают, что использована вся где-либо имеющаяся информация. На рис. 2.3 показаны все промежуточные ситуации. Обозначим начальную неопределенность – U ; U_1 – конечную после проведения оценки или измерения, тогда:

$U - U_0$ – характеризует максимальный объем информации, который может быть получен.

$U - U_1$ – объем новых знаний;

$U_2 - U_0$ – объем недостающих знаний.

Следует отметить, что чаще всего существуют расхождения между объемом полученной информации, что отражено на рисунке двумя значениями U_1 и U_2 и двусторонней стрелкой. Это обстоятельство объясняется рядом причин:

1. Недоступностью полного объема информации, поэтому в большинстве практических случаев $U_0 > 0$.
2. Несовершенством информации, когда ее характеристики недо-стоверны и несвоевременны.
3. Неадекватностью самой модели снятия неопределенности, т. е. в нее введены излишние ограничения и упрощения.
4. Двусмысленностью получаемой информации.
5. Прочими погрешностями (стиль и метод принятия решения, оснащенность техникой органа принятия решения).

Пример. Поставлен вопрос: когда открыт транзистор до 1950 г. или позже. Событие определенное, вся информация имеется. Тогда:

$$U = -1 \cdot \lg(1) - 0 \cdot \lg(0) = 0; \quad U - U_0 = 1;$$

$$U_1 = -\frac{1}{2} \cdot \lg\left(\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2} \cdot \lg\left(\frac{1}{2}\right) = 1; \quad U_1 - U = 0.$$

Более подробные сведения об оценке информационной энтропии можно получить в [5, 6].

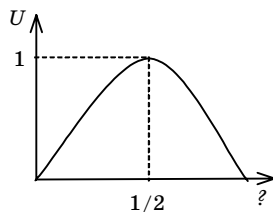


Рис. 2.2. Зависимость неопределенности в случае двух исходов

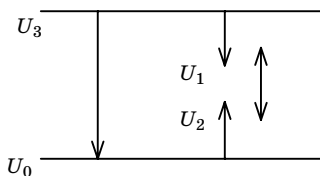


Рис. 2.3. Уровни неопределенности

2.2. Комплексная квалиметрическая оценка

Можно подходить к оценке качества продукции с разных сторон:

– Изучать только главное свойство, которое представляет наибольший интерес для потребителя (точность хода часов, ходимость шин).

– Проверять соответствие чертежам, ТУ, ОСТ, но при этом необходимо учитывать, что измеряются не характеристики качества продукции и не удовлетворяются запросы потребителя, а контролируется лишь качество работы предприятия.

– Определять комплекс характеристик (свойств) продукции.

Количественные измерения при этом производятся на основании единиц, установленных системой международных единиц СИ- SI (*system internationale*), принятых к обязательному применению в России. Перечень основных и производных единиц СИ приведен в Прил. 4.

Очевидно, что комплексная квалиметрическая оценка наиболее предпочтительна, но она затруднена по ряду причин:

1. Сравнимая продукция усложняется, свойств становится все больше.

2. Появляется много разновидностей одной и той же продукции.

3. Сокращаются периоды между сменами модели.

4. Возрастает значение последствий при неправильном решении.

Рассмотрим доводы за и против комплексных оценок. Сами возражения, представленные заголовками, задаются противником комплексных оценок, а содержание пунктов снимает эти возражения.

1. *Физическая разница свойств не позволяет оценить качество.*

Это возражение является кардинальным и отражает смысл квалиметрических оценок. В самом деле, при оценивании приходится учитывать самые разнородные характеристики. В разд. 3 рассмотрены показатели технической продукции, здесь назовем только несколько характеристик: влияние внешней среды, качество комплектующих изделий, психологический климат в коллективе и т.п. Разнородность этих характеристик является основанием для возражений. Вместе с тем, введение относительных функций, т. е. переход к безразмерным оценкам снимает это возражение:

$$K = Q = f\left(\frac{Q_i}{Q_{i0}}\right), \quad (2.2)$$

где Q_i – измеряемое значение характеристики; Q_{i0} – базовое значение измеряемой характеристики.

Например, для измеряемой температуры или освещенности помещения базовыми значениями будут требования НТД или СНИП (санитарные нормы индивидуальных помещений); для характеристик

самой продукции – лучшее значение в мире или в исследуемом классе продукции и т. д.

2. *Комплексная оценка в процентах или баллах не имеет физического смысла.* Показывая степень приближения к базовым значениям, оценка приобретает физический смысл. Это утверждение проиллюстрировано на рис. 2.4: очевидно, что проводимые улучшения увеличивают относительное значение квалиметрической оценки, приближая ее к эталонным (на данный момент времени) значениям. Сам процесс улучшения свидетельствует в пользу наполнения оценки физическим смыслом.

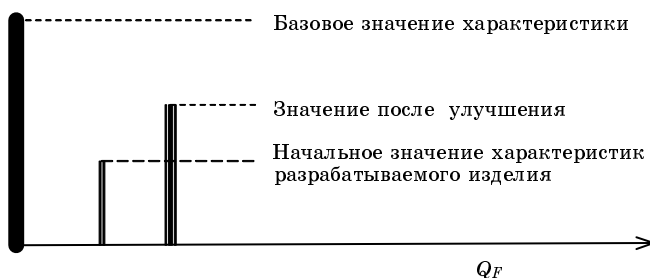


Рис. 2.4. Смысл вносимых улучшений

3. *Введение весов отдельных свойств делает оценку субъективной.*

В настоящее время разработано много методов оценки весовых коэффициентов отдельных свойств. В разных литературных источниках они могут носить названия коэффициентов важности, значимости, влияния, смысл вводимых названий поясняется в самом тексте. Общая идеология сводится к оценке вклада измеряемой характеристики в интегральное значение комплексной выходной характеристики. В самом простом случае *коэффициент значимости* определяется как математическое ожидание доли выходного эффекта [5–7].

В предельном случае, необходимо искать мгновенные интегральные значения. Следовательно, субъективизм оценок резко уменьшается при разработке и использовании все более корректных аналитических методов или методов имитационного моделирования.

4. *При комплексной оценке можно прикрыть низкий уровень одних свойств другими, более высокими.*

Это возражение поясняется на рис. 2.5. Очевидно, что подобное перекрытие отдельными свойствами низких значений других свойств не допустимо. Поэтому подобная ситуация исключается с помощью введения коэффициентов «вето» или, как их иногда называют, символов Кронекера δ_i . Символ Кронекера равен единице при превышении отдельно взятой характеристикой предельно допустимого значения и ра-

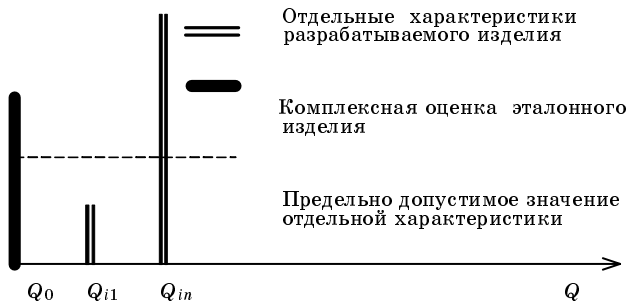


Рис. 2.5. Иллюстрация введения предельно допустимого уровня

вен нулю при снижении значения ниже допустимого. Введение мультипликативной оценки обращает ее в ноль при наличии хотя бы одного нулевого значения символа δ_i , как это следует из выражения

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & Q_i \geq Q_{KP} \\ 0 & Q_i < Q_{KP} \end{cases}; \quad Q_k = \prod_{i=1}^n Q_i \delta_i. \quad (2.3)$$

5. Оценка учитывает не все свойства.

Парируя это возражение можно использовать только логические доводы типа: три оцениваемых свойства лучше, чем одно учитываемое свойство.

Все сказанное позволяет утверждать, что комплексная оценка показателей предпочтительнее.

Функциональный способ нахождения комплексного показателя хорош, но он не всегда возможен. Поэтому от объективной функциональной зависимости переходят к субъективному образованию комплексных показателей по принципу *среднего взвешенного*. Субъективным здесь является выбор логики усреднения, сам же комплексный показатель – объективная количественная характеристика.

Прежде чем рассмотреть варианты математических выражений для средневзвешенного, приведем несколько основополагающих соображений.

1. Качество – это иерархическая совокупность свойств. Свойства могут быть простыми, аналогично типовому элементу замены – ТЭЗ, когда дальнейшее рассмотрение на принятом уровне не производится (перегоревшая электролампа, вышедший из строя микропроцессор и т. п.), и сложными. Пример сложного свойства: надежность, которая определяется безотказностью, восстанавливаемостью, сохраняемостью и долговечностью (рис. 2.6).

2. Каждое свойство необходимо и достаточно определяется:

- (абсолютным показателем) – величиной Q_i ;
- оценкой (относительным показателем) – \tilde{Q}_i ;

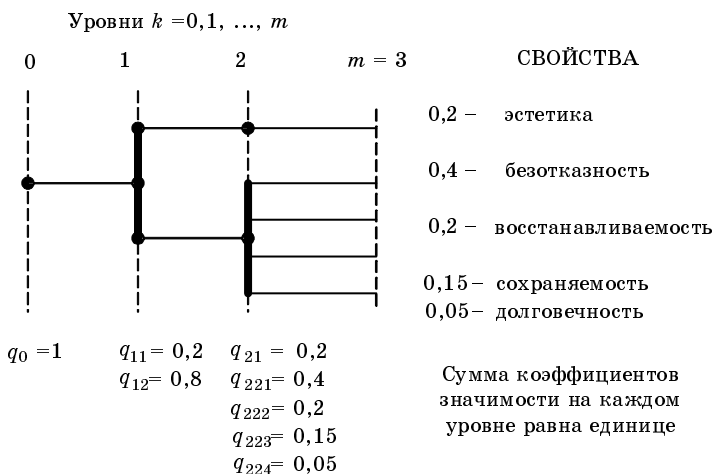


Рис. 2.6. Пример сложного (надежность) и простого свойства (внешний вид).

– весовым коэффициентом i -го свойства на k -м уровне – q_{ik} (или коэффициентом значимости).

3. Свойства любого уровня обуславливаются более простыми свойствами на более высоком уровне. В силу относительности оценок по-

казателей качества на любом уровне рассмотрения $\sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^m q_{ik} = 1$, где $i = 1, 2, \dots, n$ – количество рассматриваемых свойств, а $k = 0, 1, \dots, m$ – уровни рассмотрения. Поскольку свойства на дальнейших уровнях рассмотрения могут разделяться, то появляется третий индекс, указывающий на количество подсвойств i -го свойства (рис. 2.5).

4. Вводится понятие эталона или базы, как уже было указано. В зависимости от рассмотрения эталон может иметь разный смысл (см. табл. 1.1).

5. Оценка может быть различна, с точки зрения удовлетворения потребности, что рассмотрим далее.

6. Дифференциальные методы, т. е. оценка отдельного свойства, являются необходимым этапом комплексной оценки.

Итак, назовем несколько средневзвешенных оценок при $q_i = 1/n$:

$$\text{Арифметическое } \bar{Q} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot Q_i; \quad \bar{Q} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (2.4)$$

$$\text{Геометрическое } \bar{Q}_{\text{ге}} = \prod_{i=1}^n Q_i^{q_i}; \quad \bar{Q}_{\text{ге}} = \prod_{i=1}^n Q_i \cdot \frac{1}{n}. \quad (2.5)$$

$$\text{Квадратическое } \bar{Q} = \sqrt{\sum_{i=1}^n q_i \cdot Q_i^2}; \quad \bar{Q} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2}. \quad (2.6)$$

$$\text{Гармоническое } \bar{Q}_{\text{га}} = \frac{1}{\sum \frac{q_i}{Q_i}}; \quad \bar{Q}_{\text{га}} = \frac{n}{\sum \frac{1}{Q_i}}. \quad (2.7)$$

Пример гармонического среднего. Против течения пароход плывет со скоростью 30 км/ч, а по течению со скоростью 60 км/ч. Определить среднюю скорость. Она не равна 45 км/ч, как чаще всего отвечают студенты, а в соответствии с (2.7) равна:

$$\bar{Q}_{\text{га}} = \frac{n}{\frac{1}{30} + \frac{1}{60}} = \frac{2 \cdot 60}{3} = 40 \text{ км/ч.}$$

При числовом представлении единичных показателей их комплексирование проводится с учетом теории размерностей. Безразмерные показатели комплексировать удобнее, поэтому переходят к безразмерным относительным оценкам Q_i .

Пример среднего геометрического. Определить долговечность самолета.

Q_1 – срок службы, лет;

Q_2 – ресурс двигателя, ч;

$q_1 = q_2 = 0,5$.

Примем: $Q_1 = 12$ лет; $Q_{1 \text{ баз}} = 12$ лет; $q_1 = 0,5$.

$Q_2 = 1,8 \cdot 10^5$ ч = 20,6 лет; $Q_{2 \text{ баз}} = 22,9$ лет; $q_2 = 0,5$.

$$Q_1 = \frac{Q_1}{Q_{\text{баз}}} = \frac{12}{12} = 1; \quad Q_2 = \frac{Q_2}{Q_{2 \text{ баз}}} = \frac{20,6}{22,9} = 0,9.$$

$$\bar{Q}_{\text{ге}} = Q_1^{q_1} \cdot Q_2^{q_2} = 1^{0,5} \cdot 0,9^{0,5} = 0,949.$$

Какой вид усреднения выбрать – это проблема очень старая, чтобы уменьшить влияние субъективности выбирают ряд признаков, по которым ведут сравнение средневзвешенных. Один из таких признаков – *чувствительность* к изменениям (приращениям) каждого из единичных показателей.

Для среднеарифметического:

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial Q_i} = \frac{\partial}{\partial Q_i} \left(\sum_{i=1}^n q_i Q_i \right). \quad (2.8)$$

Когда объединяются два показателя, можно дать простое графическое представление ряду аналитических зависимостей (рис. 2.7) $Q = f(a_1, a_2)$.

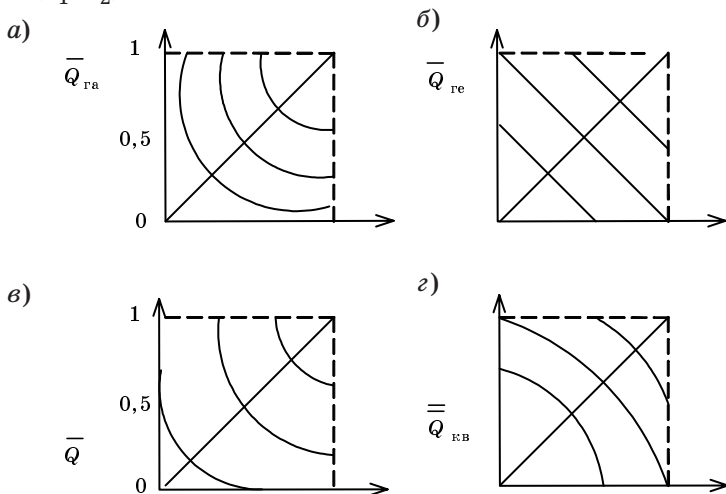


Рис. 2.7. Иллюстрация средневзвешенных оценок: а – гармоническое; б – геометрическое; в – арифметическое; г – квадратическое для комплексного показателя, равного 0,25; 0,5; 0,75.

Точки, имеющие одинаковые значения комплексного показателя, можно соединить между собой и получить *линию равного качества – изоквалиту* (*isos* – равный, *qualis* – какой по качеству). Отметим особенность, что если происходит комплексирование равных по значению единичных показателей, то вид среднего взвешенного не имеет значения.

При неравенстве (если наложить все графики на один, то выстроится ряд).

$$\bar{Q}_{га} < \bar{Q}_{ге} < \bar{Q} < \bar{\bar{Q}}. \quad (2.9)$$

При 3 показателях получаем трехмерное представление изоквальных поверхностей, 4 и более мерные поверхности представить нельзя, но во всех случаях неравенство (2.9) сохраняется. В табл. 2.1 приведены основные рекомендации по использованию средневзвешенных оценок.

Пример. Вычислим долговечность самолета разными методами. Не приводя вычислений, сведем данные в табл. 2.2.

Видно, что значение комплексного показателя мало зависит от вида средневзвешенного.

Таблица 2.1

Применяемость средневзвешенных оценок

Оценка	Характеристика
\bar{Q}	При объединении однородных показателей, разброс между которыми невелик
$\bar{Q}_{ге}$	Неоднородные показатели, имеющие большой разброс
$\bar{Q}_{га}$	Однородные показатели, но с большим разбросом
$\overline{\bar{Q}}$	Используется при решении уравнений показателей методом наименьших квадратов

Таблица 2.2

Данные примера

Оценка	Долговечность самолета
\bar{Q}	0,95
$Q_{ге}$	0,948
$Q_{га}$	0,948
$\overline{\bar{Q}}$	0,952

Во многих случаях определение числовых значений сложно, дорого или нецелесообразно, тогда экспертным методом устанавливается уровень единичных показателей, например: В = 1 – высокий; С = 0,5 – средний; Н – низкий.

Тогда

$$Q = 1 - \frac{n_n}{n} - 0,5 \frac{n_c}{n}, \quad (2.10)$$

где n_n – число показателей низкого уровня.

Если весомость единичных показателей не одинакова, то (2.10) преобразуется и приобретает вид

$$Q = 1 - \sum_{i=1}^{n_n} g_{n_i} - 0,5 \sum_{i=1}^{n_c} g_{c_i}. \quad (2.11)$$

Количество баллов, присуждаемое тому или иному показателю может варьироваться в зависимости от желания экспертов или применяемых методик. Для подчеркивания значимости какого-либо свойства может даваться 10 баллов на высшем уровне, 5 – на среднем, 1 – на нижнем. В американской практике используется метод

Метод допустимых и номинальных значений

При этом методе необходимо располагать корректными допустимыми значениями $Q_{\text{доп}}$ характеристик, ниже которых продукция однозначно признается некачественной, тогда

$$q_i = \frac{\frac{Q}{Q_{in} - Q_{\text{доп}}}}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{in} - Q_{\text{доп}}}}. \quad (2.13)$$

Коэффициент значимости в этом случае определится как математическое ожидание эффекта воздействия одного из свойств на комплексную характеристику.

Метод эквивалентных отношений

Данный метод используется только в тех случаях, когда можно оценить насколько уменьшится общий объем выпускаемой продукции при улучшении комплексного показателя на заданную величину.

Задача определения коэффициентов значимости упрощается, если в нормативной документации уже заданы подобные коэффициенты на однородную продукцию. При создании новой продукции приходится прибегать к методам моделирования или экспертного оценивания.

2.3. Порядок проведения квалиметрической оценки

Важность определения всех значимых характеристик продукции в самом начале квалиметрической оценки очевидна. Состав и подчиненность этих характеристик (свойств) можно осуществлять с помощью различных графических средств:

1. Горизонтального или вертикального дерева свойств, среди новых инструментов менеджмента качества этот метод носит название древовидной диаграммы (*tree diagram*).

2. В виде классификационной таблицы, которая, однако, применима только для небольшого числа характеристик, так как наглядность падает по мере увеличения числа свойств.

3. Строгого графа.

4. В виде ветвящейся структуры причинно-следственных связей (известных также, как схемы Исикавы или «рыбий скелет» – *fish-bound*). Следует отметить, что схемы Исикавы также критичны к числу рассматриваемых причин и поэтому им на смену пришел новый мощный метод структурирования качества по функциям – СФК (*QFD – quality function deployment*).

В теории качества широко используются 1 и 4 структуры, но причинно-следственные диаграммы и СФЖ используются в первую очередь при контроле и управлении качеством, а деревья свойств чаще используются в квалиметрии, поэтому рассмотрим их более подробно.

Процесс любой квалиметрической оценки [3, 10] можно разделить на три последовательных взаимосвязанных этапа:

Этап А – *определения ситуации оценки*, на котором необходимо провести всю подготовительную работу и определить:

– *Характеристики процессов потребления* (эксплуатации, применения, использования) продукции.

– *Варианты использования показателей качества*, полученных с помощью метода оценки качества – МОК.

– *Возможность применения того или иного МОК.*

Этап Б – *построения дерева свойств* (структурной схемы показателей качества).

Этап В – *вычисления оценки.*

Рассмотрим кратко условия оценки и перечень работ, которые необходимо учитывать и проводить на каждом этапе.

Этап А – определение ситуации оценки

1. Характеристики процессов потребления.

1.1. Нужно ли оценивать все этапы петли качества (жизненного цикла – ЖЦ)? Иногда ЛППР может пренебречь каким-либо этапом, но при этом необходимо оценить возможные негативные последствия. Например, неучет будущего уничтожения запасов накопленных отравляющих веществ. Любое исключение этапов ЖЦ надо отразить в МОК.

1.2. Нужно ли учитывать модернизацию? Следует предусматривать возможность без излишних трат вносить конструктивные изменения. Например, при массовом жилищном строительстве 60-х, не были учтены последствия физического и морального устаревания пятиэтажного панельного строительства.

1.3. Какой вид износа продукции надо учитывать? Моральный, когда изделие полностью отвечает требованиям технических условий (ТУ), но уже не конкурентоспособно; физический, когда выходные характеристики уже не удовлетворяют ТУ, или оба вместе.

1.4. Нужно ли оценивать патентную чистоту? Внутри России, вне России, что особенно важно при учете возможного вступления России в ВТО.

1.5. Нужно ли учитывать место потребления? Среди мест потребления можно назвать: город, деревню или необжитую местность.

1.6. Какие группы людей учитывать при МОК? Здесь необходимо учитывать уровень знания особенностей продукции, это могут быть не подготовленные потребители, специалисты, эксплуатирующие продукцию, и подготовленные ремонтники.

1.7. Необходимо ли учитывать особенности людей в других странах?
 1.8. Будет ли продукция использоваться в необычных условиях?
 1.9. Каковы факторы окружающей среды?
 1.10. Каково место в типоразмерной классификации? Для соответствия этому пункту необходимо определить требованиям каких международных стандартов должна соответствовать продукция (см. подразд. 1.4)

1.11. Для каких областей народного хозяйства предназначена продукция? В последнее время идея создания продукции двойного назначения находит все больше сторонников.

2. Варианты использования показателей качества.

2.1. Каков уровень социальной иерархии, учитываемый при оценке качества? Отдельный потребитель, фирма, международный консорциум и т.п.

2.2. Какой метод оценки выбрать? МОК может быть точным, приближенным, упрощенным.

2.3. В какой шкале выражать показатель? В разд. 1.3 этот вопрос рассмотрен подробно и из материала раздела следует, что выбор измерительной шкалы зависит от цели исследования.

2.4. Нужны ли дифференцированные оценки? Эта задача обычно решается автоматически, так как дифференцированная оценка показателя является этапом комплексной оценки.

3. Возможность применения того или иного МОК.

3.1. Затраты труда. Какой МОК разрабатывать и/или использовать зависит от ЛППР и это определяет лимит трудоемкости.

3.2. Затраты времени. Это ограничение определяет численность экспертов и техников и возможность анализа различных вариантов.

Этап Б – построение дерева свойств

1. *Термины.* Дополнительно к определениям, данным в глоссарии, разд. 2.2 (свойство, простое свойство, сложное свойство), введем ряд дополнительных определений:

– *Эквисатисные* свойства (*satis* (лат.) – удовлетворять) – к ним относятся свойства, эквивалентные по своему влиянию на удовлетворение потребности. Так, например, на рис. 2.8 приведен пример таких эквисатисных свойств автомобиля.



Рис. 2.8. Пример эквисатисных свойств

– *Дерево свойств* – иерархическая структура, состоящая из групп свойств, включающих сложные и простые свойства. Иллюстрация этого определения приведена на рис. 2.6.

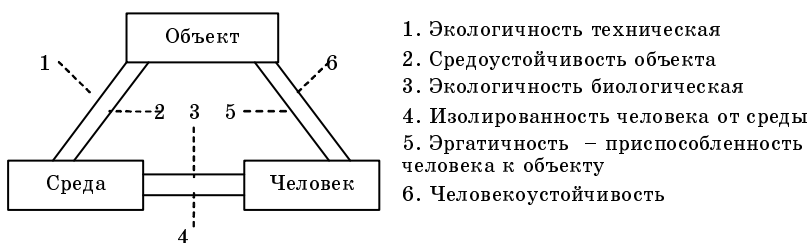
– *Уровни дерева* от 0 до t – участки дерева, заключенные между соседними секущими плоскостями. На t -уровне только простые свойства (рис. 2.6).

– Следующие термины, в связи с их очевидностью, приведем без комментариев: *участки дерева*, *полное дерево*, *неполное дерево* (до уровня $t - k$), *усеченное дерево* (без каких-либо свойств), *поддерево* (отдельный участок).

2. *Деление по равному основанию*. Этот принцип постулирует наличие единого для всех свойств группы признака деления.

3. *Корректируемость*. Классификация вводимых свойств должна быть открытой для необходимой корректировки при внесении или исключении свойств.

4. *Взаимосвязанность*. При любой квалиметрической оценке всегда рассматриваются три обязательных компонента: человек – Ч, среда – С, объект – О. Эти компоненты взаимосвязаны и взаимообусловлены. Упрощенно их взаимоотношения показаны на рис. 2.9: представлены 6 из возможных связей, приводящих попарно к появлению трех эквисатисных свойств: *экологичности*, *безызъясности* и *жизнеобеспеченности*, которые необходимо учитывать при построении дерева свойств. Причем, в дереве свойств должны присутствовать все три свойства.



Эквисатисные свойства

Экологичность (техническая и биологическая) – свойства 1 и 3

Безызъясность (средоустойчивость и человекоустойчивость) – свойства 2 и 6

Жизнеобеспеченность (изолированность и эргатичность) – свойства 4 и 5

Рис. 2.9. Связь между человеком, средой и объектом

5. *Жесткость структуры начальных уровней*. Главное свойство любого полезного объекта – это его приспособленность к функционированию – функциональность. Она проявляется: а) в основной функ-

ции объекта на разных этапах петли качества; б) в аспекте вспомогательной функции в системе «человек – среда – объект», т. е. для каждого этапа ее можно разложить на эквисатисную группу свойств: экологичность, жизнеобеспеченность, безызъянность. Таким образом, для всех объектов труда априори задается определенная структура дерева свойств (рис. 2.10).

На рисунке сплошной жирной линией обозначено главное свойство – функциональность и ее составляющие, штрих-пунктирной линией – вспомогательная функция. Вспомогательная функция для каждого из свойств разворачивается одинаково, как это показано на фрагменте В (рис. 2.10). Внизу рисунка приведены уровни членения дерева от 0 до 7. Справа от фрагмента вспомогательной функции приведены индексы окончательного членения, построенные по принципу: первый индекс указывает на номер эквисатисного свойства, второй – на членение этого свойства и т. д. Следует отметить, что все главные подсвойства продолжают без членения от 4 до 7 уровня. Итак, на рисунке представлены:

- A – основное свойство – *функциональность*;
- A₁ – функциональность при подготовке к испытаниям;
- A₁₁ – функциональность при хранении;
- A₁₂ – функциональность при транспортировке;
- A₁₃ – функциональность при разворачивании;
- A₁₄ – функциональность при ремонте;

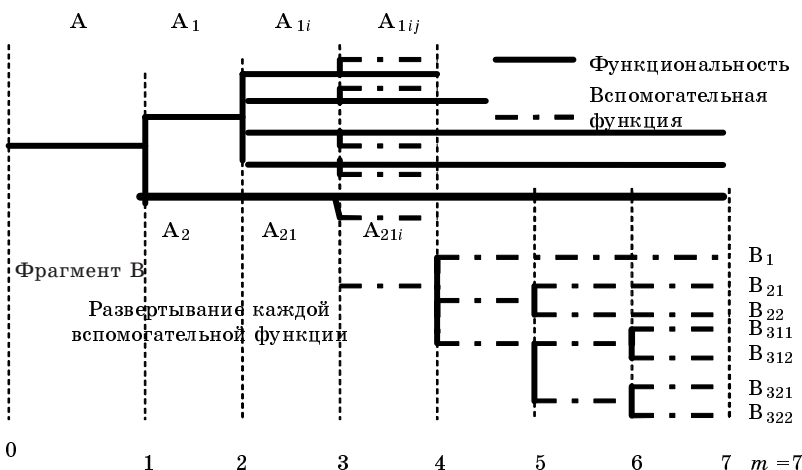


Рис. 2.10. Пример построения дерева свойств

A_{111} – приспособленность к хранению
 A_{112} – вспомогательная функция (см. фрагмент В);
 A_{121} – приспособленность к транспортировке;
 A_{122} – вспомогательная функция (см. фрагмент В);
 A_{131} – приспособленность к разворачиванию;
 A_{132} – вспомогательная функция (см. фрагмент В);
 A_{141} – приспособленность к ремонту;
 A_{142} – вспомогательная функция (см. фрагмент В);
 $A_2 = A_{21}$ – функциональность при эксплуатации;
 A_{211} – приспособленность к эксплуатации;
 A_{212} – вспомогательная функция (см. фрагмент В).
В – вспомогательная функция (см. фрагмент В), одинаковая для

пяти основных свойств;

$V_1 = V_{11} = V_{111}$ – жизнеобеспеченность;
 V_2 – экологичность;
 $V_{21} = V_{211}$ – техническая экологичность;
 $V_{22} = V_{221}$ – биологическая экологичность;
 V_3 – безызыянность;
 V_{31} – средоустойчивость;
 V_{311} – живучесть;
 V_{312} – сохраняемость;
 V_{32} – человекоустойчивость;
 V_{321} – к силовым воздействиям;
 V_{322} – к ошибкам управления.

6. Потребительская направленность свойств. Необходимо выбирать свойство, влияющее на потребление, т. е. рассматривать не средство, а цель, так, например, материал прокладки в дерево свойств не включает, а герметичность, прочность включаются.

7. Функциональная направленность. В основу построения дерева свойств берется не конструкция, а функция.

8. Необходимость и достаточность числа свойств. Необходимы только те свойства, которые обеспечивают эквисатисность со сложным свойством. Так, если известна площадь, для вычисления объема достаточно высоты, а ширина и длина не нужны. *Достаточны* же те свойства, которые определяют эквисатисное свойство.

9. Однозначность толкования свойств. Свойства, включаемые в дерево, должны одинаково восприниматься всеми экспертами или участниками мозгового штурма.

10. Недопустимость зависимых свойств. Это особенно важно на начальном этапе рассмотрения, когда одно свойство может относиться разными экспертами к разным группам. Появление таких свойств требует специального обсуждения.

11. *Случайный характер расположения.* Важность этого условия объясняется чисто человеческим фактором, так как при постановке свойства на первое место, ему могут автоматически назначить наибольший коэффициент значимости.

12. *Минимизации числа свойств на уровне рассмотрения.* Чем меньше свойств, включенных в дерево на определенном уровне, тем выше достоверность оценки, поэтому необходимо вводить при возможности следующий уровень рассмотрения.

13. *Исключение свойств надежности.* Структура дерева свойств предусматривает неизменность вносимых свойств, однако, параметры сложного свойства надежности, включающего понятия безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости и долговечности, изменяются во времени.

14. *Предпочтительность правостороннего дерева или его табличной формы.* Деревья свойств могут строиться по вертикали снизу вверх или сверху вниз (растущее дерево, корни дерева), или по горизонтали слева направо или справа налево. Очевидно, что при большом числе уровней вертикальные деревья становятся трудными для графического представления, а левосторонние деревья не воспринимаются российским или западным менталитетом.

15. *Представление свойств до одинакового уровня.* Некоторые свойства становятся простыми уже на 1-м или 2-м уровнях, некоторые на 10 – 15, поэтому все свойства приводятся к последнему m – уровню.

Примеры.

1. Построение дерева свойств для объема помещения. Рассмотрим различные варианты (рис. 2.11).

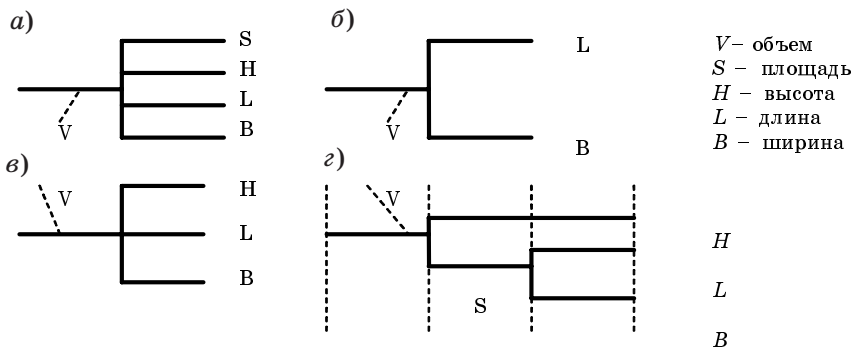


Рис. 2.11. Пример построения дерева свойств для объема помещения:
а – избыток свойств; б – недостаток свойств; в – вариант полного дерева;
г – уровни дерева

Вариант а) иллюстрирует введение избыточных свойств, вариант б) иллюстрирует недостаточность включенных свойств, варианты в) и г) идентичны, но г) предпочтительнее, так как удобнее для экспертов.

2. Построение дерева свойств для функциональности – Ф здания столовой общественного питания. Из двух эквисатисных свойств: удобство для посетителей и для персонала столовой, подробно рассмотрим одно – удобство для посетителей. Примерное дерево свойств показано на рис. 2.12

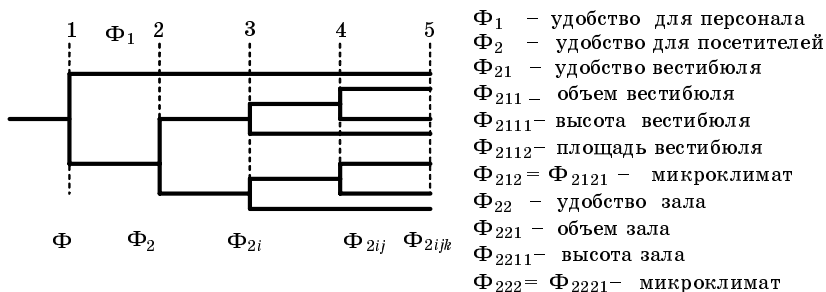


Рис. 2.12. Пример дерева свойств для столовой

Этап В – вычисление оценки

Построенные структуры деревьев или таблиц свойств служат экспертам основой для определения весов свойств методом попарного сравнения.

Для каждого i -го простого свойства вычисляется показатель Q_i (если вариантов рассматривается несколько, то учитывается номер одного из проектов проектов $j = 1, \dots, K$).

Тогда нормируем этот показатель

$$Q_{ij} = \frac{Q_{ij} - Q_i^{\text{бп}}}{Q_i^{\text{эт}} - Q_i^{\text{бп}}}, \quad (2.14)$$

где Q_{ij} – относительный показатель i -го свойства в j -м проекте; $Q_i^{\text{эт}}$ – эталонное (лучшее в мире, а не среди j проектов); $Q_i^{\text{бп}}$ – такое значение показателя, начиная с которого все более плохие имеют оценку $Q_{ij} = 0$.

Затем определяется коэффициент значимости каждого свойства (см. разд. 2.2) и окончательно:

$$Q_i^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_{ij} q_i. \quad (2.15)$$

3. КВАЛИМЕТРИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

3.1. Показатели технической продукции

Классификация показателей оцениваемой продукции регламентируется Методическими указаниями РД 50-165-82 «Выбор номенклатуры потребительских свойств и показателей качества промышленных товаров народного потребления». Основываясь на этих методических указаниях, отрасли промышленности разрабатывают свои перечни, учитывающие:

- Требования заказчика или потребителя.
- Назначение и условия использования продукции.
- Особенности менеджмента качества и т. д.

Установление номенклатуры показателей зависит от предназначения продукции, целей ее квалиметрической оценки, областей ее реализации и т. п. Если продукция предназначена для поставки за рубеж, она должна соответствовать не только требованиям контракта или ТУ на поставку, но и требованиям международных стандартов (ИСО, МЭК, МАК, морского регистра и т. д.), а также иметь патентную защиту или соответствующие лицензии патентовладельцев.

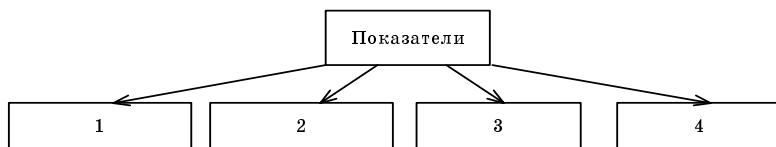


Рис. 3.1. Укрупненная классификация показателей

Дальнейшее рассмотрение показателей будет проводиться на основе рассмотрения микроэлектронной радиоаппаратуры – РЭА. На рис. 3.1 показана укрупненная классификация показателей, используемых при квалиметрических оценках.

Прямоугольники (рис. 3.1) включают в себя:

1. Характеристики свойств. Назначение, надежность, конструктивные особенности, технологичность, экономичность и конкурентоспособность, экологичность и безопасность, эргономичность и эстетичность, соответствие стандартам, патентную защищенность и т. д.

2. Количество свойств. Единичные свойства изделия или комплексные (групповые, интегральные, обобщенные).

3. Стадия определения. Прогнозируемые свойства, проектные, производственные, эксплуатационные свойства.

4. Способ выражения. Свойства безразмерные, натуральные, выраженные в единицах стоимости.

Дадим краткое описание характеристики свойств.

1А. Назначение. Микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры – РЭА, переход к микропроцессорам и СБИС в известной мере сгладили особенности радиоаппаратуры разного применения. Тем не менее, при рассмотрении показателей назначения возникают предпосылки для внутреннего разделения РЭА. Подобное разделение приведено на рис. 3.2.

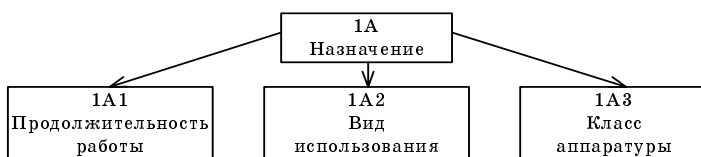


Рис. 3.2. Иерархия свойств назначения РЭА

1А1 – аппаратура разового применения, работающая один раз в процессе эксплуатации (аппаратура ракет, управляемых снарядов),
– аппаратура многократного действия, работающая с перерывами по мере необходимости (вся бытовая аппаратура, оборудование телевизионных и радиоканалов и т. п.)

– аппаратура непрерывного действия (контрольная аппаратура специального назначения, охранная сигнализация и т. п.).

1А2 – стационарная аппаратура, возимая аппаратура (автомашина, подвижной объект), носимая аппаратура.

1А3 – наземная аппаратура, предназначенная для эксплуатации в условиях, характерных для района использования (крайний север, средняя полоса, тропики), предусматривающая возможность модернизации в процессе эксплуатации. В зависимости от вида использования в ней должны учитываться особенности эксплуатации (замкнутость и температура пространства автомашины, механические нагрузки при переноске человеком или передвижении автомашины).

– морская аппаратура (корабельная, судовая, буйковая), учитывающая особенности применения (100% влажность, солевой туман, вибрационные и ударные перегрузки, наличие электромагнитных, акустических и радиационных полей) и большую автономность плавания с отрывом от ремонтных баз.

– бортовая аппаратура (аппаратура, устанавливаемая на самолетах, ракетах, космических аппаратах), учитывающая особенности использования (ударные перегрузки, разреженность воздуха, ограниченность массогабаритных характеристик и т. п.)

1Б. Надежность. Само понятие надежности, как свойства продукции сохранять за установленное время значение всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в условиях применения, технического обслуживания, хранения, показывает, что оно является сложным свойством. Чаще всего рассматривают единичные свойства безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости. Такие понятия, также входящие в определение надежности, как устойчивость работы, процессная управляемость, живучесть при внешних воздействиях, большинством авторов рассматриваются отдельно и, более того, утверждается, что они не имеют отношения к надежности. Сама характеристика надежности довольно трудна для представления, так как она носит статистический характер.

Появление микроэлектронных, а с начала 90-х годов наноэлектронных устройств привело к парадоксальному, на первый взгляд, результату – резкое увеличение числа элементов в системе привело к одновременному возрастанию характеристик надежности. Объяснение этого “парадокса” довольно просто: надежность элементов шла опережающими темпами по сравнению с ростом сложности. Так, если в 70-е годы интенсивность отказов оценивалась значениями 10^{-5} – 10^{-6} единиц отказа в час (т. е. один из миллиона элементов откажет в течение часа), то для микроэлектронных элементов была уже предложена единица, названная фитом (*failure digit*), равная 10^{-9} , и уже есть сообщения, что наноэлектронные изделия оцениваются тысячными долями фита. В справедливость этих утверждений можно верить умозрительно, так как автору неизвестны методы статистической оценки таких малых величин. Например, для подтверждения интенсивности отказов 10^{-2} с доверительной вероятностью 90% и заданной точностью требуется проведение испытаний длительностью не менее 3200 часов (для одного образца). Уже на этапе исследования систем проекта Аполлон, разработчики отказались от проведения определительных испытаний характеристик надежности. Второе обстоятельство, характерное для микроэлектронной аппаратуры: участок приработки оказывается длиннее, чем срок морального устаревания аппаратуры. И, наконец, характеристика средней наработки на отказ для сложной радиоаппаратуры практически не имеет физического смысла [5,6]. Однако все заказчики и существующие

нормативные документы требуют включения характеристик надежности, поэтому любая квалиметрическая оценка проводится с учетом этого свойства.

1В. Конструкционные особенности. Общемировая тенденция к унификации радиоаппаратуры привела к созданию ряда базовых несущих конструкций (БНК), включенных в международный стандарт ИСО/МЭК и разделяющихся на три уровня:

– БНК 1-го уровня: различные функциональные ячейки, входящие в ряд предпочтительных чисел;

– БНК 2-го уровня, включающие в себя корпуса блоков для функциональных ячеек, каркасы блоков, блоки вставные, авиационные, настольные;

– БНК 3-го уровня, включающие в себя стойки выдвижные, шкафы, пульта, столы приборные.

В результате применения унификации число типов шкафов, применяемых в мировой практике, снизилось с 300 до 22, число типов блоков с 750 до 16, число типов ячеек с 1500 до 8. Экономический эффект от этой операции исчисляется миллионами долларов.

1Г. Технологичность. К числу основных показателей технологичности относятся трудоемкость, материалоемкость, энергоемкость, себестоимость. Каждый из этих показателей может быть общим, сравнительным или относительным. Показатели технологичности относятся к таким этапам жизненного цикла изделия как производство, эксплуатация, ремонты и утилизация. В связи с этим для каждого из указанных этапов рассчитываются свои показатели технологичности. Расчеты технологичности регламентируются стандартами Единой системы конструкторской документации – ЕСКД, Единой системой подготовки производства – ЕСПП, Правилами обеспечения технологичности конструкции, поэтому в пособии они не рассматриваются.

1Д. Экономичность и конкурентоспособность. В рыночных условиях эта характеристика становится одной из определяющих. Ведь даже самый успешный экспортный сектор российской экономики, дающий 17,5% ВВП за счет усилий 4% трудоспособного населения, выигрывает только за счет низкой цены природных ресурсов и труда, т. е. практически остается не конкурентоспособным по отношению к мировому рынку. Ограниченность инвестиций заставляет искать рациональные решения в Парето-оптимальном множестве, снижая стоимость продукции и эксплуатационные расходы при сохранении или даже повышении характеристик качества. При этом, никоим образом нельзя решать проблему эко-

номичности, снижая только внутренние издержки организации. Необходимо помнить, что при расчете экономичности необходимо учитывать все три составляющие потерь, а именно: организация (производитель) – потребитель – общество.

1Е. Экологичность и безопасность. Свойство экологичности проявляется в системе: человек – среда – объект (см. разд. 2.3) и приобретает все большее значение для общества в целом. Недавно утверждены стандарты ИСО 14000 по экологическому мониторингу, гармонизированные по принципам менеджмента качества со стандартами ИСО 9000. Требования по экологичности и безопасности стали основными в законе Российской Федерации № 412 от 25 декабря 2002 г. «О техническом регулировании». Требования по экологичности включают в себя нормы по предельно допустимым характеристикам загрязнения окружающей среды и определяют меры борьбы с нежелательными воздействиями. Требования по безопасности можно разделить на две группы.

– Безопасность и производственная санитария, предусматривающие защиту работающих от воздействия опасных и вредных физических факторов и нервно-психических перегрузок при производстве или эксплуатации. Так, кроме учета температуры, освещенности, шумов и вибраций и т. д., в радиоэлектронной аппаратуре необходимо учитывать наличие высокого напряжения и электромагнитных излучений. Предельно допустимые нагрузки электромагнитного поля (ЭМП) приведены в табл. 3.1. Напряженность электрического поля E имеет размерность В/м, напряженность магнитного поля H имеет размерность А/м и плотность потока энергии W имеет размерность Вт/м². В диапазоне частот f до 300 МГц применяются значения E и B , в диапазоне $f = 300$ МГц – 300 ГГц применяется вектор W .

Таблица 3.1

Предельно допустимые нагрузки ЭМП

f	3 МГц	30 МГц	50 МГц	300 МГц	300 ГГц
E	50	20	10	5	–
H	5	0,5	0,3	0,1	–
W	–	–	–	–	0,1

– Безопасность самой продукции для потребителя (электрическая, шумовая, вибрационная, химическая, радиационная и т. п.). Закон о техническом регулировании предусматривает именно эту составляющую безопасности.

1 Ж. Эргономичность и эстетичность. Свойство эргономичности включает в себя антропометрические и психофизиологические требования. Антропометрические требования учитывают соответствие размеров конструкции радиоаппаратуры размерам частей тела и рабочей позы среднестатистического оператора. Психофизиологические требования должны учитывать физиологические свойства человека. К ним можно отнести число индикаторов на пульте управления, их цвет, возможность слуховой и осязательной реакции оператора и т. д., что должно снизить утомляемость и снизить скорость реакции. Эстетичность или дизайн в последнее время приобретает все большее значение, так как довольно часто российские товары, имея лучшие технические характеристики, но не привлекательный внешний вид, становятся не конкурентоспособными. Эстетичность включает в себя следующие требования к внешнему виду конструкции РЭА: выразительность, рациональность формы, целостность композиции, совершенство производственного исполнения. Эти характеристики, как нельзя более, соответствуют квалиметрическим оценкам, так как количественные критерии в этом случае подобрать довольно сложно.

1 З. Соответствие стандартам. Это требование не только заставляет полностью соответствовать международным стандартам, что особенно важно в преддверии вступления в ВТО, но и предусматривать опережающие требования отрасли, выбирать прогрессивные методы учета показателей, включаемых в стандарты, предусматривать унификацию решений и т. д.

1 И. Патентная защищенность. Новые решения (ноу-хау) представляют собой промышленную собственность с исключительным правом на нее предприятия разработчика. Однако это право необходимо защитить в соответствии с нормами международного права. Если до получения приоритета в виде российского патента или патентов стран, куда предполагается поставка продукции, суть решения стала известна неопределенно широкому кругу лиц, то патентная защита отсутствует. В этом случае продукция теряет в своей привлекательности и может послужить поводом для привлечения к судебной ответственности в связи с отсутствием лицензии на ее изготовление. Предметом защиты являются полезные модели, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки. Охраноспособной признается одна из упомянутых категорий при нахождении новизны, существенных отличий, полезности и должного юридического оформления.

Категории 2,3,4 (рис. 3.1) достаточно очевидны и поэтому оставлены без комментариев.

3.2. Принципы принятия решений при оценивании

Процесс принятия решения относится к любому виду человеческой деятельности, так как представляет собой последовательность принятий решений от элементарных до самых сложных. В простых ситуациях не требуется использования сложных аналитических методов, вполне достаточно опыта, навыков или интуиции. При создании же сложных технических структур, внедрении многофакторных инвестиционных и/или экологических проектов, управления в чрезвычайных ситуациях, у лица, принимающего решения (ЛПР), нет уверенности в правильном выборе и ему необходимо обращаться к методам теории принятия решений, входящей в круг проблем *системного анализа* [5,6]. Системный анализ представляет собой научное направление, связанное с исследованием слабоструктурированных сложных проблем междисциплинарного характера.

В любой ситуации, в том числе и при квалиметрической оценке, принятие решений происходит в диапазоне «Неопределенность (см. 2.1) – Риск (см. далее в этом подразделе) – Определенность». Принятие решений в области полной определенности не представляет сложности и чаще всего приводит к малоэффективным решениям (достаточно вспомнить идею «конкурентных ножниц»), поэтому искусство менеджера состоит в возможности принятия решений с учетом разумного риска.

Стоимость принятия решения по достижению поставленной цели сопоставляется с полезным эффектом от принятого решения. Тогда выходной показатель Q_f – качество целевого функционирования определится:

$$Q_f = C_r / C_T, \quad 3.1$$

где C_r – эффект от принятого решения; C_T – суммарные затраты.

Оценки по выражению (3.1) проводятся для конкретных изделий, с учетом конкретных условий их использования и поэтому не могут быть описаны какими-то стандартными аналитическими выражениями. Для того чтобы это утверждение было более понятно, рассмотрим факторы, влияющие на принимаемое решение, обобщенный алгоритм принимаемого решения и оценку рисков при принятии решения.

А. Факторы, влияющие на принимаемое решение

Принимаемое решение должно основываться на информации, которая, в свою очередь, зависит от многих факторов:

– *Оперативности*, характеризующейся способностью своевременно направлять или исправлять реакции системы. Оперативность

является переменной величиной, так как она зависит от времени возникновения изменений Q_f и оценивается временем *цикла принятия решения*.

– *Обоснованности*, характеризующейся способностью находить нужное воздействие, подтвержденное фактами. Обоснованность зависит от глубины и тщательности анализа различных вариантов изделий и/или оценки различных режимов использования и оценивается числом рассмотренных вариантов. Следует отметить, что объективность и обоснованность находятся в обратно пропорциональной зависимости друг от друга.

– *Категоричности*, характеризующейся способностью принимать решения в ясной форме, не допускающей иных толкований. Категоричность зависит от числа параметров, включаемых в решение и возможности их практической реализации.

– *Охвата*, характеризующегося способностью включения в рассмотрение всех свойств изделия или групп изделий. Охват зависит от структуры системы или организации, стремлений ЛПП, возможностей анализа всех вариантов. Охват и оперативность также диалектически противоположные категории.

– *Непрерывности*, характеризующейся способностью непрерывного получения информации и/или непрерывного влияния на реакции изделия или организации. Непрерывность весьма трудна для практической реализации и применима чаще всего для объектов специального назначения (ядерных реакторов, энергетических установок и т. п.).

При использовании этих характеристик необходимо также учитывать ряд факторов, определяющих стиль и алгоритм принимаемого решения. Среди этих факторов можно назвать:

- учет воздействия среды и сфер, в нее входящих;
- ориентированность на цель или на средства решения;
- качество характеристик оперативной информации (достоверность, оперативность, старение и безопасность);
- повторяемость процесса решения;
- эффективность принятия решения (оптимальное, рациональное, не эффективное);
- приемлемость принятых решений;
- возможность реализации;
- уровень ответственности (гражданской, социальной, моральной, уголовной);
- степень риска (допустимая, предельная, катастрофическая).

Очевидно, что перечень названных факторов не полон, в конкретной ситуации можно учитывать и ряд других, например монотон-

ность, синергизм или асинергизм КЦФ, автономность решений, объект принимаемого решения (процесс, система, структура) и т. д. Но все эти вопросы больше относятся к системному анализу, а в квалиметрических оценках они должны использоваться при построении дерева свойств.

Б. Алгоритм принимаемого решения

При принятии решения можно выделить три уровня, для каждого из которых внутренняя структура остается неизменной (рис. 3.3). В числе уровней принятия решения можно назвать:

- информационное решение, при котором проводится сбор необходимой информации и разрабатывается план исследования;
- организационное решение, при котором вырабатываются мероприятия, направленные на достижение цели (приказ по организации, приказ на изменение технических параметров, план мероприятий и т. п.);
- управленческое решение, при котором оформляется конкретный документ, доводится до исполнителей, осуществляется контроль исполнения.



Рис. 3.3. Процесс принятия решений:

- — цикл принятия решения с точками принятия решения;
- — анализ результатов предыдущего варианта;
- — время подготовки текущего варианта;
- === — время решения текущего варианта;
- ←— — этап работы команды и/или ЛОР;
- ↔ — этап работы ЛПР;
- === — принятие решения, оформление результатов решения, контроль за исполнением

Каждый этап может быть представлен в виде процесса (рис. 3.3). Весь процесс состоит из одного или нескольких *циклов принятия решения*, каждый цикл располагается во времени между *точками принятия решения* (черные кружки на рисунке). Цикл принятия

решения делится на три подцикла: обоснование решения лицом, обеспечивающим решение (ЛОР); принятие решения лицом, принимающим решение (ЛПР); заключительный подцикл оформления и контроля решения. Таких циклов в процессе функционирования изделия может быть несколько. На рис. 3.3 показан $K+1$ цикл от K до $K+1$ точек принятия решения. Каждый подцикл подготовки решения ЛОР состоит из i ($i = 1, 2, \dots, m$) вариантов, каждый подцикл принятия решения ЛПР состоит из j ($j = 1, 2, \dots, n$) вариантов, подцикл оформления решения происходит один раз за цикл. Число рассматриваемых в подциклах ЛОР и ЛПР вариантов зависит от многих причин (наличия времени, средств, квалифицированных экспертов) и выбирается индивидуально, сообразуясь с обстоятельствами.

Каждый вариант состоит из трех фаз: оценка и анализ результатов предыдущего варианта, подготовка к оценке текущего варианта, проведение оценки текущего варианта. Каждая из этих фаз отмечена на рис. 3.3 различными линиями. Между оценками вариантов может существовать временной разрыв, не показанный на рисунке. На самом деле алгоритм принятия решения намного сложнее и рис. 3.3 иллюстрирует лишь саму идею.

В. Оценка рисков при принятии решения

Ранее в разделе риски при принятии решения были отнесены к числу факторов, влияющих на принятое решение. Учитывая, что в современной реальной обстановке инвестиции практически всегда ограничены, приходится решать задачу максимизации КЦФ при ограничениях, наложенных на ресурсы (финансы, материалы, оборудование, персонал). При этом неизбежны ошибки первого и второго рода (см. прил. П.2) и появление рисков.

Классификация задач принятия решения показана на рис. 3.4.

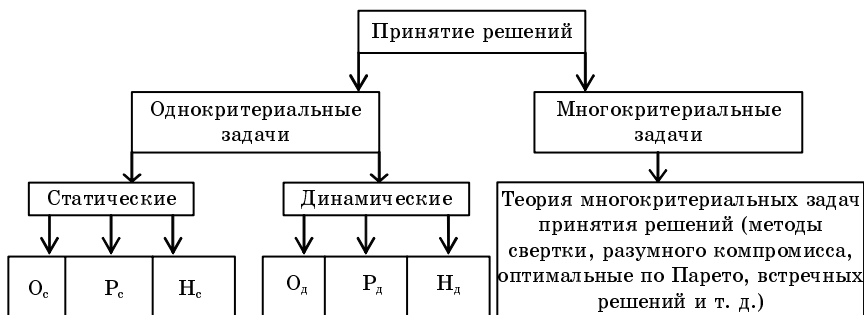


Рис. 3.4. Классификация задач принятия решения

Из рисунка видно, что как статические, так и динамические решения могут приниматься в условиях определенности, риска или неопределенности. Причем для каждого из этих случаев существуют свои математические методы. Кратко проиллюстрируем некоторые из них:

O_c – математическое программирование, линейное, нелинейное, динамическое, *компьютерное моделирование, экспертные методы*.

P_c – вероятностные методы, математическое программирование, *компьютерное моделирование, экспертные методы*.

H_c – теория игр, минимаксные решения, статистические решения, *компьютерное моделирование, экспертные методы*.

O_d – вариационное исчисление, теория оптимальных систем, *компьютерное моделирование, экспертные методы*.

P_d – теория случайных процессов, статистическая динамика, *компьютерное моделирование, экспертные методы*.

H_d – теория дифференциальных игр, теория катастроф, *компьютерное моделирование, экспертные методы*.

Курсивом выделены методы, применимые для всех случаев, а именно компьютерное моделирование, включая методы Монте-Карло и имитационное моделирование; а также различные методы экспертных процедур (см. разд. 4, 5, 6 пособия).

Многокритериальная оптимизация в корректном виде ждет еще своего Эйнштейна. Чаще всего при наличии нескольких целей и необходимости нахождения комплексного оптимального решения исследователи прибегают к упрощениям и допущениям, смысл которых сводится к следующим операциям:

– аппроксимация КЦФ и ресурсных ограничений сравнительно несложными аналитическими выражениями, допускающими простые аналитические решения,

– упрощение производных, используемых в условиях оптимальности Куна и Таккера.

– введение принципа разумного компромисса или метода уступок, когда проводится ранжирование выходных показателей и решение принимается последовательно по наиболее значимому показателю, затем при наличии остаточных ресурсов по следующему критерию и т. д.

– применение метода свертки выходных критериев.

– использование метода встречных решений, при котором мажорирующие последовательности строятся одновременно от начала и от конца.

Каждый из упомянутых методов приводит естественно к ошибке, оценить которую бывает весьма затруднительно. В пособии методы многокритериальной оптимизации не рассматриваются.

Обратимся теперь непосредственно к *риску* принятия решения. Разные авторы дают понятию риск разные определения, например:

– риск – принятие решений, когда возможен неблагоприятный исход;

– риск – вероятность отклонения фактического значения КЦФ от ожидаемого значения;

– риск – неопределенность получения ущерба (снижения объема продаж, страхового, инвестиционного, банковского, технического и т. п.);

– риск – *возможность совершения ошибки при квалитметрической оценке.*

Последнее определение, выделенное курсивом, примем для использования в пособии.

В любом случае, при квалитметрическом оценивании стоит задача максимизировать значение КЦФ при минимизации риска оценки. При этом, необходимо четко осознавать, что при использовании любой статистической измерительной шкалы возможно получить ошибку, приводящую к необходимости использования статистического распознавания гипотез (см. прил. П.2). В настоящее время возникла и успешно развивается научная дисциплина *рискология*, которая рассматривает риски на качественном и количественном уровнях, вводя стоимостные, физические или относительные измерители.

При принятии решения в квалитметрии все параметры N ($i = 1, 2, \dots, N$) можно разбить на следующие группы:

– контролируемые параметры $X_j, j = 1, 2, \dots, K$;

– неконтролируемые детерминированные параметры $U_l, l = 1, 2, \dots, L$;

– неконтролируемые стохастические параметры $Z_m, m = 1, 2, \dots, M$;

– не выявленные параметры $W_o, o = 1, 2, \dots, O$.

Очевидно, что $K+L+M+O = N$, а выражение для КЦФ Q_f запишется в виде функционала

$$Q_f = \Phi (X_j, U_l, Z_m, W_o, C_i, t), \quad (3.2)$$

где C_i – вводимые ограничения, а t – текущее время.

Решение задачи принятия решения сводится к отысканию комбинации контролируемых параметров, обеспечивающих максимум КЦФ при минимизации риска получения неверного решения при неучете всех остальных групп параметров, входящих в уравнение (3.2).

3.3. Методы принятия решений при учете неопределенности информации и нечеткости условий

3.3.1. Выбор на основании числовой информации

Задачи выбора по числовой информации в условиях риска возникают в том случае, когда с каждой рассматриваемой стратегией принятия решений V_i связано некоторое множество возможных результатов КЦФ – Q_1, Q_2, \dots, Q_m с известными условными вероятностями $P(Q_j/V_i)$. Формально модель выбора решения в условиях риска можно записать в виде матрицы $z = \|z_{ij}\|, i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$:

Стратегия	Результаты					
	Q_1	Q_2	...	Q_j	...	Q_m
$V1$	Z_{11}	Z_{12}	...	Z_{1j}	...	Z_{1m}
$V2$	Z_{21}	Z_{22}	...	Z_{2j}	...	Z_{2m}
...
Vn	Z_{n1}	Z_{n2}	...	Z_{nj}	...	Z_{nm}

где $Z_{ij} = f(Q_j, V_i)$ – полезность результата Q_j при использовании стратегии V_i .

Пусть известны условные вероятности $P(Q_j/V_i), i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$.

Введем понятие ожидаемой полезности Π для каждой стратегии V_i

$$M\{\Pi(V_i)\} = \sum_{j=1}^m \Pi(Q_j; V) P(Q_j/V_i), i = \overline{1, n}, \quad (3.3)$$

где M – оператор математического ожидания.

Решающее правило для определения оптимальной стратегии имеет вид

$$V^* = \underset{V_i}{\text{Arg max}} M\{\Pi/V\} \quad (3.4)$$

В задачах выбора решений в условиях риска предполагается, что вероятность достижения результатов Q_j зависит только от стратегии V_i , выбранной ЛПР. Если допустить, что эта вероятность зависит не только от стратегии (V_i), но и от внешней среды (S_k), то возникают задачи выбора решений в условиях неопределенности. В данном случае неопределенность связана с тем, что ЛПР неизвестно распределение вероятностей $P(S_k)$, с которыми внешняя среда может находиться в одном из состояний $\{S_k\}, k = \overline{1, K}$. Лицо, принимающее решение,

высказывает только определенные гипотезы относительно состояния среды, задавая субъективные вероятности $P(S_k), k = 1, K$.

Если бы вероятность $P(S_k)$ была известна, то ЛППР имел бы дело с задачей принятия решений в условиях риска. В этом случае выбор стратегии V^* определяется следующим образом:

$$V^* = \underset{V_i}{\text{Arg max}} j \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K \Pi(Q_j, V_i) P(Q_j / V_i, S_k) = \text{Arg min } M \{ \Pi(V_i) \}. \quad (3.5)$$

Однако в действительности ЛППР не известны как состояния среды, так и распределение вероятностей $P(S_k)$. В этом случае для выбора оптимальной стратегии используется один из четырех критериев: Вальда, Гурвица, Лапласа или Сэвиджа.

Критерий Вальда (критерий осторожного ЛППР – пессимиста) оптимизирует полезность результата в предположении, что среда находится в самом невыгодном для ЛППР состоянии. Решающее правило для выбора стратегии X^* имеет вид:

$$\max_{V_i} \min_{S_k} \Pi(V_i, S_k),$$

$$\text{где } \Pi(V_i, S_k) = \sum_{j=1}^m \Pi(Q_j, V_i) P(Q_j / V_i, S_k). \quad (3.6)$$

Стратегия V^* , выбранная по критерию Вальда, дает гарантированный выигрыш при наихудшем варианте состояния среды.

Критерий Гурвица использует две гипотезы: H_1 – среда находится в самом невыгодном состоянии с вероятностью $1-\alpha$; H_2 – среда находится в самом выгодном состоянии с вероятностью α .

Решающее правило имеет вид :

$$\max_{V_i} \left[\alpha \max_{S_k} \Pi(V_i, S_k) + (1-\alpha) \min_{S_k} \Pi(V_i, S_k) \right], \alpha \in [0,1]. \quad (3.7)$$

Если $\alpha = 0$, то получаем критерий Вальда («пессимиста»).

Если $\alpha = 1$, то формируется решающее правило вида:

$$\max_{V_i} \min_{S_k} \Pi(V_i, S_k), \quad (3.8)$$

которое соответствует стратегии «оптимиста», когда ЛППР верит в максимальную удачу.

Критерий Лапласа. Если неизвестны состояния среды, то их считают равновероятными

$$p(S_1) = p(S_2) = \dots = p(S_k) = \frac{1}{k}.$$

Решающее правило имеет вид

$$\max_{V_i} \frac{1}{k} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K \Pi(Q_j, V_i) P(Q_j / V_i, S_k). \quad (3.9)$$

Критерий Сэвиджа (критерий минимизации сожалений). Сожаление – это величина, равная изменению полезности результата при данном состоянии среды относительно наилучшего возможного состояния.

Этот критерий минимизирует возможные потери при условии, что состояние внешней среды наилучшим образом отличается от предполагаемого состояния. Решающее правило имеет вид

$$\min_{S_k} \max_{V_i} \Pi_{cik}, \quad \Pi_{cik} \in \Pi_c. \quad (3.10)$$

Пример. Использование представленных критериев в условиях неопределенности для практической задачи выбора решения о применении сложной системы – СС. Матрицу полезности представим в виде:

Таблица 3.2

Данные примера

а 3.2	Нет потребности	Есть потребность
СС не использовать	$U_{11} = 10$ тыс. р.	$U_{12} = -100$ тыс. р.
СС использовать	$U_{21} = -10$ тыс. р.	$U_{22} = 100$ тыс.р.

Вероятности $P(S_1)$ и $P(S_2)$ неизвестны.

В представленном примере расчеты по формулам 3.6–3.10 дают вывод о возможном применении любого из критериев. Однако в общем случае чаще всего встречается ситуация, когда четыре различных критерия приводят к четырем разным решениям.

На практике различные критерии приводят к выбору разных альтернатив и возникает новая проблема выбора уже не альтернатив, а критериев. Здесь возможны два подхода. Первый – разработка критериев или требований для выбора критерия. Второй – использование дополнительной информации о вероятных областях применения СС у различных пользователей, что позволит заменить принятие решений в условиях риска с единственным критерием выбора. Второй подход требует, как правило, значительных дополнительных затрат. В этом смысле, на первый взгляд, более предпочтителен первый подход. Однако исследования Льюиса и Райфы привели к отрицательному выводу о перспективности первого подхода, состоящего в рекурсивном задании не только критериев для выбора критериев, но и

критериев для выбора критериев по выбору критериев и т. д. Отсюда следует вывод, что «не существует критерия выбора решения, не использующего вероятностных оценок для состояний $\{S_k\}$ внешней среды (природы) и вместе с тем удовлетворяющего определенным “разумным” требованиям к “хорошему критерию”.

Следовательно, выбор критерия является творческим актом и должен производиться ЛПР на самом высоком уровне. В частности, если не допустим даже минимальный риск (безопасность людей, ответственные оборонные системы и т. д.), то лучше использовать критерий Вальда. Критерий Сэвиджа удобен, если приемлем определенный риск, но целесообразно израсходовать столько средств для достижения цели, чтобы ЛПР потом не жалел о том, что израсходовано слишком мало средств.

В задачах выбора решений в условиях неопределенности и риска постоянно используется понятие функции полезности $U(Q_j, x_i)$.

3.3.2. Определение функции полезности

Рассмотрим методику оценки полезности для количественных критериев. Пусть имеется n возможных результатов стратегий оценки поведения СС, между которыми установлено отношение предпочтения $V_1 > V_2 > \dots > V_n$. В этом случае для определения полезности используется следующая схема.

1. Определяем величину α_1 из условия:

$$\alpha_1 \Pi(V_1) = \Pi(V_2),$$

аналогично определяем

$$\alpha_2 \Pi(V_2) = \Pi(V_3)$$

...

$$\alpha_{n-1} \Pi(V_{n-1}) = \Pi(V_n).$$

2. Приняв полезность наименее предпочтительного результата стратегии СС, равной 1, находим

$$\Pi(V_n) = 1,$$

$$\Pi(V_{n-1}) = \frac{1}{\alpha_{n-1}},$$

...

$$\Pi(V_1) = \frac{1}{\prod_{i=1}^{n-1} \alpha_i}.$$

3.11

Если некоторые из критериев не оцениваются количественно, а заданы в виде качественных характеристик, то для оценки полезности можно использовать алгоритм Р. Акофа и Р. Черчмена [6], логика которого сводится к следующим операциям.

1. Упорядочивают результаты стратегий СС по убыванию предпочтительности $V_1 > V_2 > \dots > V_n$.

2. Составляют таблицу возможных комбинаций результатов стратегий СС, достигаемых одновременно, а затем устанавливают их предпочтение относительно отдельных результатов, эту информацию о предпочтительности получают от экспертов.

3. Задают начальные оценки полезности отдельных результатов $P_0(V_i)$. Затем подставляют начальные оценки в последнее соотношение. Если оно сохраняет смысл, то начальные оценки не изменяются. В противном случае корректируют полезности, так чтобы удовлетворялось данное соотношение.

4. Переходят к следующему соотношению.

Процесс коррекции продолжается до тех пор, пока не образуется система оценок $P^*(V_i), i = 1, n$, которая удовлетворяет всем полученным соотношениям. Коррекцию следует производить таким образом, чтобы по возможности изменять оценки для минимального количества результатов ДПП СС.

Иногда оценка полезности должна быть получена в результате объединения n экспертных оценок различных свойств одного и того же решения. Решение этой задачи является весьма сложным и составляет одну из основных проблем квалиметрии.

3.3.3. Принятие решений по нечеткой качественной информации

Опыт, накопленный при рассмотрении задач выбора решений в условиях определенности, неопределенности и риска, позволяет отметить, что среди важнейших проблем, связанных с этими задачами, следует выделить представление нечетких знаний (*fuzzy logic*) о характеристиках диагностируемых СС и среды пользователей. Сложность описания этих характеристик на естественном языке требует применения новых формальных методов и концепций принятия решений, в частности, теории нечетких множеств. Введенное Л. Заде в 1965 г. понятие размытого (нечеткого) множества в настоящее время является перспективной концепцией исследований и активно используется в процедурах и алгоритмах принятия решений по нечеткой качественной информации.

К нечетким (расплывчатым) категориям при выборе решений относятся такие характеристики, которые представлены в качествен-

ной форме, например, «тяжелые условия эксплуатации СС», «недостаточно высокое качество СС», «медленное решение задач» и т. д. Расплывчатые категории возникают там, где представления ЛПП выражаются с помощью недостаточно определенных качественных оценок.

В основе расплывчатых категорий и нечетких множеств лежит понятие лингвистической переменной (ЛП), т. е. такой переменной, которая выражается не числом, а словом на естественном языке.

Трудности манипулирования расплывчатыми категориями, содержащимися в текстах, представленных на естественном языке и связанных с необходимостью их формального представления при оценке диагностируемых СС, выборе и принятии решений, успешно преодолены Л. Заде с помощью введения понятий «нечеткого множества» и «функции принадлежности». В отличие от классической теории множеств элементы которых либо принадлежат к ним, либо не принадлежат, Л. Заде рассматривает такие множества, элементы которых обладают разной степенью принадлежности этому множеству. О степени принадлежности конкретного элемента к некоторому нечеткому множеству судят по значению его функции принадлежности, изменяющейся в интервале $[0, 1]$. При этом крайние значения ($0\sqrt{1}$) характеризуют соответственно полную непринадлежность или полную принадлежность данного элемента нечеткому множеству.

Различным аспектам теории нечетких множеств в научной литературе посвящено более 2000 публикаций, в частности, рассмотрены задачи линейного программирования (ЛП) с нечеткими (размытыми) ограничениями, задачи ЛП с нечеткими коэффициентами, задачи нечеткого математического программирования с четкими целями, задачи определения размытого множества Парето и модели взвешенной свертки нечетких локальных критериев. В этих публикациях можно выделить два основных направления. Одно из них состоит в «размывании» существующих математических понятий, т. е. в замене «жесткого» отношения принадлежности элемента множеству на функцию принадлежности, введенную Л. Заде; так возникают нечеткие аналоги известных математических теорий. Второе направление состоит в разработке методов количественного описания нечетких ситуаций и последующего использования известного аппарата теории принятия решений в условиях неопределенности или риска. Дальнейшее развитие работ первого направления связано с разработкой механизма оперирования с размытыми объектами. Исследования в этом направлении только начинаются и пока отсутствуют конкретные инженерные результаты. В то же время в рамках второго

направления получен ряд инженерных результатов, которые уже сейчас позволяют решать прикладные задачи выбора решений. Объем настоящего пособия не позволяет более подробно рассмотреть обозначенные вопросы. Однако автору известны первые примеры использования нечетких множеств при квалиметрических оценках. Использование ЛП позволяет достаточно простыми инженерными расчетами преобразовать задачу принятия решений по качественной информации для нечетных множеств в задачу принятия решений в условиях неопределенности и риска.

4. ЭКСПЕРТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ

4.1. Экспертные оценки в квалиметрии

Рассмотрению различных методов экспертиз посвящено множество публикаций, в библиографическом списке, приведенном в пособии, практически все источники, за исключением [6,8,12], в той или иной мере освещают эту проблему. Наряду с различными аналитическими методами, практически для каждой ситуации принятия решения может быть применено экспертное оценивание (рис. 3.4, разд. 3). Основной задачей современных экспертных технологий является повышение эффективности и качества принимаемых решений. Из практики измерений известно, что чаще всего однократное измерение неудовлетворительно. Недаром, как говорит народная мудрость – семь раз отмерь, один раз отрежь. Качество результата измерения можно повысить путем многократного выполнения измерительного эксперимента, корректной обработки данных и их представление в виде результата многократных измерений. При этом возможно многократное измерение:

- одним средством при постоянстве условий измерений;
- разными средствами при переменных условиях измерений;
- разными средствами в разное время (уникальные образцы – например пробы лунного грунта).

При экспертных методах подход будет аналогичным, если считать экспертов средством измерения. Качество измерения повышается за счет привлечения новой дополнительной информации и увеличения объема измерительной информации. На рис. 4.1 показана укрупненная блок-схема принятия решений на основе экспертных оценок [12].

Объект оценивания рассматривается органом экспертизы (ОЭ), могущим состоять из группы экспертов или ЛППР. В ОЭ входит субъект экспертизы, имеющий в распоряжении набор методов и средств, названный оператором оценивания. Эксперты подбираются на основе заданных правил экспертизы, что характеризуется вектором данных об экспертах. Информация на выходе ОЭ может быть представлена в терминах любой статистической измерительной шкалы и выражена в виде количественной, качественной или лингвистической информации. По-

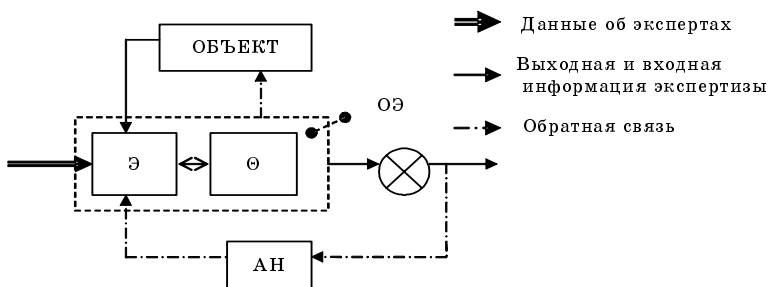


Рис. 4.1. Блок схема экспертного оценивания: Э – эксперт; О – оператор оценивания; ОЭ – орган экспертизы; АН – анализ данных

лученная выходная информация поступает на вход анализатора (АН), представляющего собой группу специалистов, оценивающих качество принимаемых экспертами решений (достаточность, согласованность) и необходимость проведения следующего тура оценивания. В группу анализа может входить ЛПР, решение которого становится обязательным для ОЭ. В общем случае в коллективной экспертизе всегда участвуют три группы специалистов: руководитель, группа подготовки и анализа и непосредственно эксперты. Саму экспертизу, можно разделить на три перекрывающихся этапа:

- подготовки экспертизы;
- проведения экспертизы;
- оценки результатов и принятия решения.

На каждом из этапов можно уточнять решения, принятые на предыдущем этапе. Эта многоэтапная процедура экспертного оценивания на самом деле выглядит гораздо сложнее. Более подробно эти вопросы рассмотрены в [9, 10], в настоящем пособии остановимся на укрупненном рассмотрении.

При подготовке экспертизы руководителю и аналитикам группы подготовки необходимо решать следующие вопросы:

- определить ситуацию, при которой будет проходить экспертиза, цели и приоритеты этих целей,
- определить ожидаемые сценарии развития ситуации,
- предложить методику отбора будущих экспертов, систему тестового оценивания, процедуры повышения, степени согласованности мнений экспертов. При этом должны учитываться такие характеристики эксперта, как независимость, эластичность (возможность переключения с оценки одного показателя на другой), контактность, мотивированность оценок, креативность (умение решать задачи, методы решений которых малоизвестны), эвристичность (возможность выявлять неочевидные решения), предикатность (способность пред-

видеть будущее решение), всесторонность, объективность, адаптивность (способность к коррекции оценок при получении новой информации), неконформизм (способность противостоять мнению большинства при уверенности в своей правоте).

Классификация экспертных процедур может быть построена на основе ряда критериев:

1. *Индивидуальные и коллективные*: критерий – количество экспертов.

2. *Однотуровые и многотуровые*: критерий – число итераций.

3. *Без обмена информацией и с обменом*: критерий – возможность обмена информацией.

4. *Открытые и анонимные*: критерий – степень закрытости.

На этапе проведения экспертизы непосредственно осуществляется оценка поставленных задач с помощью одного из возможных методов, чаще всего объединяющего приведенные нами критерии. В числе таких методов можно назвать:

– методы *круглого стола* (методы комиссий, «суда»), когда взаимодействие экспертов, находящихся вместе в одном помещении, ничем не регламентируется и за счет обсуждения неверные решения могут быть отброшены,

– метод *мозговой атаки*, когда коллективный обмен информацией частично регламентирован, так как любое высказанное мнение не подлежит обсуждению и не может быть отвергнуто,

– методы *изолированной работы* (методы сценариев, прогнозного графа), когда каждый эксперт высказывает свое мнение изолированно, независимо от оценок других экспертов. Степень согласованности при этом достаточно мала.

– методы *обратной связи* (метод Делфи, разработанный Хелмером и Делки, его модификации, метод последовательного экспертного опроса), когда после первого этапа изолированной экспертной процедуры группа аналитиков обрабатывает полученные результаты и сообщает их всем экспертам для уточнения оценки на следующем туре. Число туров зависит от сходимости согласованной оценки.

Среди применяемых методов экспертного оценивания наиболее широкое применение находят метод Делфи и его модификации.

Укажем основные отличительные особенности метода Делфи. Процедуры, используемые в этом методе, характеризуются *анонимностью, регулируемой обратной связью и групповым ответом* [4]. Анонимность позволяет ослабить влияние наиболее авторитетных экспертов. Введение обратной связи делает оценки более надежными, повышает объективность степени согласованности мнения группы. При использовании метода Делфи необходимо, чтобы:

- каждый эксперт располагал одинаковой информацией, достаточной для осуществления оценки;
- оценка по каждому вопросу была обоснована экспертом;
- поставленные вопросы допускали возможность оценки в виде числа.

Структура опросных анкет от тура к туру претерпевает изменения и становится более конкретной.

В классической форме метода анкета первого тура может вообще ставить бесструктурные вопросы, относящиеся к началу экспертизы, связанные с целями и проблематикой экспертизы. В этом случае полагают, что эксперты знают проблемную область лучше, чем организаторы экспертизы. Однако такой подход связан с большими недостатками и возможными ошибками, которые более подробно рассмотрены в подразд. 4.2. Во втором туре экспертам предлагают их коллективное мнение, прошедшее через обработку группой аналитиков, и просят высказать мнение по правильности ранжировки, после чего аналитики могут оценить статистические характеристики. Полученные статистики доводятся до сведения всех экспертов. Подобная процедура с уточнением вопросов анкеты и определением тенденции к росту согласованности мнений (коэффициент конкордации) оканчивается, как только достигается заданный уровень коэффициента конкордации. При анализе промежуточных результатов происходит формирование группового решения, выделяются группы экспертов с близким мнением, выявляются причины разброса мнений, оценивается качество оценок и компетентность оценок. Некоторые из возможных методов обработки, полученных в ходе экспертизы статистических результатов, представлены в подразд. 4.3.

При анализе сложных систем используются методы решающих матриц, метод проблемных сетей, методы ПАТТЕРН и КУЭСТ [10]. Эти методы заслуживают отдельного рассмотрения, но в силу направленности учебного пособия не рассматриваются.

По мере усложнения оцениваемых систем технологии экспертного оценивания претерпевают изменение, и нарастает необходимость обращения к возможностям информационных технологий (разд. 5).

4.2. Недостатки и возможные ошибки экспертного оценивания

При появлении нового метода исследования часто наступает ощущение эйфории и все стараются использовать его в самых неожиданных областях. При этом выясняется, что применение метода приводит к большим ошибкам или просто к неверным результатам. В этом случае начинается критика и отторжение метода. Так, например,

произошло с теорией информационной энтропии, когда Шеннону пришлось выступить со знаменитой статьей «*Information Theory isn't Band Wagon*», в которой он предостерегал от неоправданного распространения теории на экономику и социологию. Примерно то же самое происходит с применением экспертных оценок. Далеко не все проблемы могут быть решены с помощью экспертов. Достаточно проанализировать долгосрочные прогнозы Римского института, при высочайшем уровне экспертов (лучшие в своей области) уровень выполнения прогнозов, при глубине прогноза десять лет, не превышает 50 %. Поэтому необходимо представлять характер возможных ошибок и стараться избегать их при процедуре экспертного оценивания.

Ошибки при подготовке экспертизы

1. Излишнее увлечение здравым смыслом по принципу «я знаю все сам».

Однако ЛППР не может одинаково профессионально знать все возникающие проблемы. Примеры: решение Лигачева об антиалкогольной компании, гонение на генетику при Лысенко, т. е. следует соблюдать принцип, что нельзя экономить при стрельбе на прицеливании.

2. Использование некомпетентных экспертов. Это происходит при недостаточно серьезном отношении к проведению экспертизы, плохой информированности о компетентности экспертов, желании потратить минимум средств и т. п.

3. Нечеткая постановка задачи или отсутствие корректной априорной информации.

4. Стремление остаться в рамках одной экспертной процедуры. Чаще всего один тур не может дать ответ на поставленные вопросы. Иногда даже следует организовать параллельную работу нескольких экспертных комиссий или объединять разные экспертные методы.

Названные ошибки возникают на первых двух этапах и могут дискредитировать саму идею возможности экспертного оценивания. Поэтому компетентность всех участников экспертизы, владение тонкостями технологии проведения экспертизы являются необходимыми условиями успеха.

Ошибки, которые могут возникнуть

на этапе проведения экспертизы и оценки ее результатов

1. Нарушение принципов теории измерений. При использовании шкалы предпочтений значения выставленных баллов не являются числовой оценкой. Разница в свойствах никак не определяется расположением в ранжированном ряду. Во избежание подобных ошибок шкала должна быть не менее слабой, чем шкала интервалов. При групповой оценке может нарушаться принцип транзитивности, когда первый экс-

перт считает, что А П В, второй, что В П С, а третий считает что С П А ! В этом случае эксперты пользуются разными критериями предпочтения. В настоящее время разработаны методы, уменьшающие разночтения, возникающие при парных сравнениях [10].

2. Стремление учесть многокритериальность. В процессе экспертного оценивания приходится учитывать многокритериальность оценок. При этом прибегают к введению коэффициентов значимости, т. е. прибегают к *методу свертки*. Точность полученных результатов оценить очень трудно. Если взвешиваемые критерии имеют разную физическую природу, то ошибка вообще не может быть оценена. Поэтому использование метода свертки должно быть четко регламентировано и возможно только в случае полной уверенности в его необходимости.

3. Неточность процедуры коллективного отбора. Необходимо избегать применения правила простого большинства, так при большом числе экспертов может возникнуть ситуация, когда один из объектов поставлен на первое место двумя экспертами, а всеми другими на одно из последних мест, в то время как другие при среднем оценивании могут оказаться выше. Чтобы избежать такой ситуации следует пользоваться процедурой ранжирования, а не простым указанием предпочтения для отдельного эксперта.

4. Организация информационного взаимодействия. Пополнение априорной информации должно происходить не только за счет поступления новой внешней информации, но и за счет получения информации о решениях всех экспертов на предыдущем туре экспертизы.

5. Конформизм или конъюнктурность экспертов. Конформизм заключается в пассивном принятии мнения большинства или авторитета, предположим, что почти все эксперты поставили высший балл, а один наиболее авторитетный – низкий, и остальные эксперты согласились с мнением одного. Конъюнктурность заключается в получении выгоды для себя или представляемой организации, например, эксперт представляет фирму, заинтересованную в финансировании.

6. Неправильная обработка результатов экспертизы. При оценивании один и тот же параметр может получить разные оценки. Проблема состоит в оценке точности полученного результата. При этом каждый эксперт мог пользоваться своим критерием. Например, можно точность δ определять как разность между истинным значением – И и оценкой эксперта – Э, можно определять как логарифм их отношения, можно определять как отношение разности к истинному значению. Этот недостаток устраним за счет четкой организации экспертизы.

7. Некорректная интерпретация результатов. Иногда результаты экспертизы используются как исходные данные для корректных аналитических моделей. Подобная практика приводит к ошибкам излишней формализации. Так, например, методы математического программирования требуют задания входной информации в самой мощной статистической шкале отношений, в то время как результаты экспертизы определены в шкале предпочтений или, в лучшем случае, в шкале разностей. Иногда результаты экспертизы носят формальный характер, когда конечный результат очевиден и все будет решено в пользу определенной организации. Это типичный случай управляемой экспертизы, когда необходимо лишь соблюсти правила игры.

Для повышения эффективности и точности экспертизы необходимо четко пользоваться правилами составления дерева свойств (см. подразд. 2.3), помня при этом, что при многокритериальной экспертизе надо удовлетворить ряду условий, делающих экспертизу корректной. В числе этих условий следует назвать:

1. *Полнота* свойства: входящие в набор характеристики должны обеспечивать адекватную оценку объекта.

2. *Однозначность* свойства: смысл характеристики должен одинаково пониматься и экспертами и ЛПР.

3. *Минимальная размерность*: в набор свойств должны включаться только те, без которых оценка невозможна.

4.3. Обработка данных экспертизы

Методов обработки экспертной информации существует достаточно много [4, 10–12], рассмотрим некоторые наиболее распространенные, разделив их на методы численных оценок и методы ранжирования.

Метод прямых численных оценок

Этот метод используется для решения любых задач оценки качества. Наиболее часто его применяют для получения значений коэффициентов значимости, различных единичных свойств качества. Сущность метода заключается в сопоставлении каждому единичному свойству числа, характеризующего его значимость. Пусть в экспертизе участвует N , $i = 1, \dots, N$ экспертов, каждый из которых имеет свой коэффициент компетентности α и оценивается S , $j = 1, \dots, S$ отдельных свойств. Тогда результат экспертизы можно представить в виде прямоугольной матрицы, в которой строки соответствуют оценкам индивидуального свойства всеми экспертами:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11}, & Q_{12}, & \dots & Q_{1N} \\ Q_{21}, & Q_{22}, & \dots & Q_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{S1}, & Q_{S2}, & \dots & Q_{SN} \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Результующая оценка строится по формуле средневзвешенного и итоговое выражение имеет вид

$$\bar{Q}_j = \frac{\sum_{i=1}^S Q_{ij} \alpha_i}{\sum_{i=1}^S \alpha_i}. \quad (4.2)$$

При отсутствии информации о компетентности эксперта или при ее равенстве коэффициент α принимается равным единице.

Степень согласованности мнений экспертов относительно единичного свойства определяется с помощью коэффициента вариации v , равного

$$v = \sigma_j / \bar{Q}_j, \quad (4.3)$$

где σ_j – стандартное отклонение результатов экспертизы по j -му свойству

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Q}_j - Q_{ij})^2 \alpha_i}{\sum \alpha_i}}. \quad (4.4)$$

При этом рекомендуется [4, 10] использовать следующие предельные значения, приведенные в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Предельные значения СКО

σ	Определение согласованности
0,1	Высокая
0,11–0,15	Выше средней
0,16–0,25	Средняя
0,26–0,35	Ниже средней
0,36 и выше	Низкая

Статистическая значимость полученных результатов будет зависеть от объема оцениваемой выборки $N \times S$, вида функции распределения и уровня доверительной вероятности (см. прил. П.2).

Пример 4.1. Предположим, что группа из 10 экспертов оценивает качество учебного пособия по 10-балльной шкале (новизна, актуальность, изложение материала и т.п.). Наилучшим показателем является 10. Каждому эксперту выдана опросная анкета с оцениваемыми показателями. В результате опроса получены данные, сведенные группой анализа в табл. 4.2

Таблица 4.2

Сводные значения экспертизы

$Q_j \setminus N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10	9	10	9	10	9	10	10	10	10
2	9	9	9	8	9	9	8	9	8	8
3	6	6	6	6	6	5	6	6	5	6
4	10	9	8	8	8	9	9	9	8	8
5	7	7	7	7	7	7	7	7	8	7
6	9	10	10	10	10	9	9	10	10	10
7	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5
8	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
9	7	8	8	7	9	7	9	8	8	9

Произведем обработку полученных данных, вычислим среднее значение с помощью (4.2), а СКО с помощью (4.4). При этом будем считать, что компетентность экспертов одинакова, доверительная вероятность принята равной 90%. На основе этих цифр определены значения верхней q_{iU} и нижней q_{iL} границ доверительного интервала:

$$q_{iU} = \bar{Q}_j + \Delta_j; q_{iL} = \bar{Q}_j - \Delta_j.$$

Расчеты сведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Результаты статистических оценок

Q_j	\bar{Q}_j	σ_j	v	q_{iL}	q_{iU}
1	9,7	1,449	0,149	9,07	10
2	8,6	1,549	0,18	7,92	9,28
3	5,8	1,265	0,218	5,25	6,35
4	8,6	2,098	0,24	7,69	7,51
5	7,1	0,949	0,13	6,69	7,51
6	9,7	1,449	0,149	9,07	10
7	4,9	0,949	0,193	4,48	5,31
8	2,9	0,949	0,327	2,48	3,31
9	8	2,44	0,306	7,23	8,77

Как видно из полученных результатов, степень согласованности мнений экспертов для большинства свойств – средняя или выше средней. Однако при оценке восьмого и девятого свойства мнения экспертов различаются и показатель согласованности ниже среднего.

Данные табл. 4.2, приведены при условии, что коэффициенты значимости свойств одинаковы, однако, на практике это бывает весьма редко. Примем разные значения коэффициентов значимости (табл.4.4).

Таблица 4.4

Коэффициенты значимости свойств

Q_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вес	0,14	0,15	0,14	0,14	0,05	0,12	0,1	0,07	0,09

При этих значениях $\bar{Q} = 7,596, \sigma = 1,576$ степень согласованности $\nu = 0,21$, т. е. при введении значимости отдельных свойств, степень согласованности оказалась средней. Значения оценки при 89 степенях свободы (см. Прил. 2) лежат в интервале от 7,382 до 7,810.

Иногда используется модифицированный метод численных оценок, когда каждый эксперт проставляет не одну, а три оценки, характеризуя их как пессимистическую, наиболее вероятную и оптимистическую оценку. Расчеты при этом усложняются за счет получения средних значений для каждого эксперта.

Метод вероятностных оценок

В этом случае интервал допустимых значений показателя качества разделяется на k равных интервалов $t_l, l = 1, 2, \dots, k$. Эксперту предлагается высказать свое мнение путем оценки вероятности попадания p_{jl} оцениваемой величины в каждый из этих интервалов. При этом обязательно, чтобы сумма вероятностей попадания, выставленная каждым экспертом, равнялась единице. Результаты работы всех экспертов удобно представить в виде таблицы (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Значения вероятностей

$S_j \setminus t_l$	t_1	t_2	...	t_k
1	p_{11}	p_{12}	...	p_{1k}
2	p_{21}	p_{22}	...	p_{2k}
...
S	p_{S1}	p_{S2}	...	p_{Sk}

На основании результатов, приведенных в табл. 4.5, можно определить обобщенное мнение экспертов в виде вероятностей попадания оцениваемой величины в заданный интервал с помощью выражения

$$P_{jl} = \frac{\sum_{j=1}^S p_{jl} \alpha_j}{\sum_{j=1}^S \alpha_j}. \quad (4.5)$$

В качестве результирующей оценки обычно принимается медиана полученного распределения T_m , определяемая из условия

$$P_m(t_m \leq T_m) = 0,5. \quad (4.6)$$

Статистическая значимость может быть оценена по величине диапазона квартилей $\Delta q = q(0,75) - q(0,25)$, при этом оценка считается значимой, если диапазон квартилей в 3,2 раза меньше всего интервала допустимых значений показателя.

Пример 4.2. Рассмотрим оценку показателя качества внешнего вида переносного транзисторного приемника. Для этого примем 100-балльную систему оценки от 0 до 100. Разобьем интервал на 10 равных отрезков: 1–10; 11–20; ...; 91–100. Затем 7 выбранным экспертам предложим высказать свое мнение путем оценки вероятности попадания в один из интервалов при соблюдении обязательного условия равенства суммарной вероятности единице.

Таблица 4.6

Результаты оценки внешнего вида приемника

$S_j \setminus T$	1–10	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60	61–70	71–80	81–90	91–100
1	0	0	0,05	0,05	0,1	0,2	0,3	0,3	0	0
2	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1	0
3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4	0	0	0	0	0,2	0,3	0,3	0,2	0	0
5	0	0	0,05	0,05	0,1	0,1	0,5	0,1	0,05	0,05
6	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0,25	0	0
7	0	0	0	0,05	0,05	0,2	0,4	0,2	0,1	0
P_o	0,014	0,014	0,028	0,036	0,093	0,193	0,43	0,193	0,05	0,021

Результаты экспертизы представим в табл. 4.6, считая, что компетентность экспертов одинакова и равна единице. Используя выражение (4.5), определим обобщенное значение вероятности, приведенное в последней строке табл. 4.6. Медианой распределения обобщенной оценки будет являться интервал 61–70. Таким образом, в качестве результирующей оценки может быть принята оценка 65 или в десятибалльной шкале оценка 7,25% всех наблюдений соответствует квантилю 0,45, а 75% всех наблюдений квантилю 0,7. Отсюда их разность 0,25, что указывает на значимость полученных результатов.

Метод строгого ранжирования

1. Изменение рангов от 1 до 0.

Качество информации повышается, если результат измерения представлен ранжированным рядом, имеющим смысл, если объекты экспертизы имеют одинаковую природу.

Порядок действия при этом таков:

1. Объекты располагаются в порядке их предпочтения. Место, занятое объектом, называется рангом.

2. Наиболее важному объекту приписывается балл (весовой коэффициент), равный 1, всем остальным в порядке уменьшения от 1 до 0. При этом чаще всего используют обратную шкалу оценок Харрингтона (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Обратная шкала Харрингтона

№ п.п	Градация	Числовое значение
1	Очень высокая	0,8–1,0
2	Высокая	0,64–0,8
3	Средняя	0,37–0,64
4	Низкая	0,2–0,37
5	Очень низкая	0,0–0,2

3. Сопоставляется первый объект с совокупностью всех остальных, если он предпочтительнее, то результат измерения в баллах корректируется в сторону увеличения и наоборот.

4. Сопоставляется второй объект и так далее до последнего объекта.

5. Полученные результаты нормируют, они принимают значения от 0 до 1, а их сумма равна 1.

Тогда

$$q_i = \frac{\sum_{j=1}^n G_{ij}}{\sum_{i=1}^{n,m} G_{ij}}, \quad (4.7)$$

где G_{ij} – коэффициент весомости j -го показателя в баллах, оцениваемый i -м экспертом; m – число объектов; N – количество экспертов.

Пример 4.3. Мнение пяти экспертов выражено следующим образом (табл. 4.8).

Таблица 4.8

Расположение объектов

Объект экспертизы	1	2	3	4	5	6	7
1	Q_5	Q_3	Q_2	Q_1	Q_6	Q_4	Q_7
2	Q_5	Q_3	Q_2	Q_6	Q_4	Q_1	Q_7
3	Q_3	Q_2	Q_5	Q_1	Q_6	Q_4	Q_7
4	Q_5	Q_3	Q_2	Q_1	Q_4	Q_6	Q_7
5	Q_5	Q_3	Q_1	Q_2	Q_6	Q_4	Q_5

Построить ранжированный ряд и определить весомость членов ряда.

Решение:

$$Q_1 = 4 + 6 + 4 + 4 + 3 = 21$$

$$Q_2 = 3 + 3 + 2 + 3 + 4 = 15$$

$$Q_3 = 2 + 2 + 1 + 2 + 2 = 9$$

$$Q_4 = 6 + 5 + 6 + 5 + 6 = 28$$

$$Q_5 = 1 + 1 + 3 + 1 + 1 = 7$$

$$Q_6 = 5 + 4 + 5 + 6 + 5 = 25$$

$$Q_7 = 7 + 7 + 7 + 7 + 7 = 35$$

$$\Sigma 140$$

Результат многократного измерения приводит к ряду:

$$Q_5 < Q_3 < Q_2 < Q_1 < Q_6 < Q_4 < Q_7.$$

По формуле (4.7) рассчитаем конкретные значения коэффициентов:

$$q_1 = 21/140 = 0,15; q_2 = 15/140 = 0,11; q_3 = 9/140 = 0,06;$$

$$q_4 = 28/140 = 0,2; q_5 = 7/140 = 0,05; q_6 = 25/140 = 0,18;$$

$$q_7 = 35/140 = 0,25. \sum_{i=1}^7 q_i = 1.$$

Мнение экспертов можно выразить в форме таблиц попарного соответствия. При попарном соответствии достаточно одной половины таблицы вверх от диагонали. Предпочтение при этом выражается номером предпочтительного объекта. Балл или весомость рассчитываются по формуле (4.7), модифицированной в виде $G_{ij} = \frac{F_{ij}}{C}$, где G_{ij} –

коэффициент весомости j -го показателя i -м экспертом; F_{ij} – частота предпочтения i -м j -го объекта; C – общее число суждений одного эксперта, связанного с числом объектов:

$$C = \frac{m(m-1)}{2}.$$

Пример 4.4. Предположим для простоты, что 5 экспертов высказались о 6 объектах одинаково (табл. 4.9).

Таблица 4.9

Данные о мнениях экспертов

№ объекта	1	2	3	4	5	6
1	–	1	3	1	1	1
2		–	3	2	2	2
3			–	3	3	3
4				–	5	6
5					–	6
6						–

Определить весомость и построить ряд.

1. Частоты предпочтений.

$$F_{i1} = \frac{4}{5} = 0,8; F_{i2} = \frac{3}{5} = 0,6; F_{i3} = \frac{5}{5} = 1;$$

$$F_{i4} = \frac{0}{5} = 0; F_{i5} = \frac{1}{5} = 0,2; F_{i6} = \frac{2}{5} = 0,4.$$

2. Общее число суждений

$$C = \frac{6(6-1)}{2} = 15.$$

3. Балл по общему мнению

$$G_1 = q_1 = \frac{0,8}{15} + \frac{0,8}{15} + \frac{0,8}{15} + \frac{0,8}{15} + \frac{0,8}{15} = 0,27;$$

$$t_2 = q_2 = 0,2; \quad q_3 = 0,33; \quad q_4 = 0; \quad q_5 = 0,07; \quad q_6 = 0,13;$$

$$\sum q_i = 1$$

(значения G_i уже нормированы и поэтому могут использоваться как q_i).

4. Ранжированный ряд

$$Q_3 > Q_1 > Q_2 > Q_6 > Q_5 > Q_4.$$

Опыт попарного сопоставления (табл. 4.9) показывает, что в силу особенностей человеческой психики эксперты бессознательно отдают предпочтение не более важному в паре объекту, а первому. Чтобы этого избежать используют свободную часть и сопоставляют через некоторое время объекты в обратном порядке. При таком сопоставлении, называемом полным или двойным, удается:

а) избежать случайных ошибок;

б) выявить экспертов, не имеющих собственного мнения или относящихся к обязанностям небрежно, порядок расчетов остается прежним за исключением того, что $C = m(m-1)$.

Уточнить результаты, полученные попарным сопоставлением, можно методом *последовательного приближения*: первоначальные результаты (см. п. 3 примера 4.4) рассматриваются как первое приближение. Во втором приближении они рассматриваются как коэффициенты $G_i(2)$ суждений экспертов, новые рассматриваются как $G_i(3)$ и так далее. Согласно теореме Перрона – Фробениуса этот процесс практически всегда сходится и нормированные результаты измерений q_i стремятся к постоянным величинам, строго отражающим соотношение между объектами при заданных исходных данных.

Пример 4.5.

В табл. 4.10 представлены результаты полного попарного сопоставления одним экспертом 5 объектов экспертизы. Причем предпочтение j -го объекта перед i -м обозначается 2, равенство объектов 1, предпочтение i -го перед j -м равно 0.

Найти результат 3-го приближения. При числе экспертов m необходимо переходить к методике многократного измерения.

Таблица 4.10

Попарное сопоставление одним экспертом

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	$G_j(1)$	$q_1(1)$	$G_j(2)$	$q_1(2)$	$G_j(3)$	$q_1(3)$
1	1	2	2	1	2	8	0,32	36	0,395	124	0,435
2	0	1	2	2	2	7	0,28	27	0,297	83	0,291
3	0	0	1	0	0	1	0,04	1	0,011	1	0,04
4	1	0	2	1	2	6	0,24	22	0,242	70	0,246
5	0	0	2	0	1	3	0,12	5	0,055	7	0,024
						25	$\Sigma = 1$	91			

1. В первом приближении

$$G_1(1) = 1+2+2+1+2 = 8; G_2(1) = 7, G_3(1) = 1, G_4 = 6; G_5 = 3;$$

$$q_1(1) = 0,32; q_2(1) = 0,28; q_3(1) = 0,04; q_4(1) = 0,24; q_5 = 0,12;$$

$$\Sigma q_1(1) = 1.$$

2. Второе приближение (столбец $G_j(1)$ множится на строку).

$$G_1(2) = 8 \cdot 1 + 7 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 6 \cdot 1 + 3 \cdot 2 = 36,$$

$$G_2(2) = 8 \cdot 0 + 7 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 6 \cdot 2 + 3 \cdot 2 = 27,$$

$$G_3(2) = 8 \cdot 0 + 7 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 6 \cdot 0 + 3 \cdot 0 = 1,$$

$$G_4(2) = 8 \cdot 1 + 7 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 6 \cdot 1 + 3 \cdot 2 = 22,$$

$$G_5(2) = 8 \cdot 0 + 7 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 6 \cdot 0 + 3 \cdot 1 = 5,$$

$$q_1(2) = 36/91 = 0,315; q_2 = 0,297; q_3 = 0,011; q_4 = 0,242;$$

$$q_5 = 0,055.$$

3. Третье приближение (столбец $G_j(2)$ множится на строку).

$$G_1(3) = 36 \cdot 1 + 27 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 22 \cdot 1 + 5 \cdot 2 = 124,$$

$$G_2 = 83; G_3 = 1; G_4 = 70; G_5 = 7.$$

4. Значения q_i (табл. 4.10) отличаются в каждом приближении. Первый объект подчеркивает свое превосходство, а 3-й и 5-й имеют все меньшую значимость.

Метод последовательного приближения, позволяет получить строгие количественные измерения по шкале отношений, во сколько раз лучший превосходит худший. В этом случае через это отношение α

предпочтение j -го перед i -м выражается числом $1+\Delta$, равноценность 1, а предпочтение i -го перед j -м числом $1-\Delta$, где

$$\Delta = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} + \sqrt{\frac{0,05}{m}}. \quad (4.8)$$

После этого попарное сопоставление производится методом последовательного приближения. Процесс уточнения q_j продолжается, пока точность не достигнет заданной

$$|q_j(k) - q_j(k-1)| \leq \varepsilon, \quad (4.9)$$

где обычно ε принимают равным $\varepsilon = 0,001$, если $1 < \alpha \leq 1,5$ и $\varepsilon = 0,01$, если $\alpha > 5$. При промежуточных значениях α выбирают промежуточные значения ε .

После окончания расчетов фактическое отношение значений показателей крайнего члена ранжированного ряда α_Φ сравнивают с ис-

ходным α , если $\beta = \frac{\alpha}{\alpha_\Phi} \rightarrow 1$, задача решена, в противном – корректируется значение точности

$$\Delta = \beta \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} + \sqrt{\frac{0,05}{m}} \right),$$

и расчет повторяется.

2. Значения рангов от 0 до числа рассматриваемых объектов

При этом методе разным экспертам, независимо друг от друга, предоставляется ряд объектов. Эксперт определяет ранг объекта, в зависимости от номера предпочтения. Так, лучшему объекту присваивается ранг, равный единице, следующему в ряду предпочтений ранг, равный двум и т. д. Предположим, что в результате работы S экспертов получены результаты оценки N объектов, сведенные в табл. 4.11.

В последней строке таблицы выставляется сумма рангов, полученная каждым объектом, определяемая из выражения

$$R_i = \sum_{j=1}^S r_{ij}. \quad (4.10)$$

Упорядочивание объектов производится в соответствии с величиной R_i , причем на первое место ставится объект, набравший меньшую сумму R_i .

Степень согласованности мнений экспертов определяется при помощи коэффициента конкордации V . При использовании метода стро-

Определение рангов объектов

Эксперты	Объекты			
	1	2	...	N
1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1N}
2	r_{21}	r_{22}	...	r_{2N}
...
S	r_{s1}	r_{s2}	...	r_{sN}
Σ рангов	R_1	R_2	...	R_N

ного ранжирования, когда у объектов отсутствуют равные ранги, величина коэффициента конкордации определится из выражения

$$V = \frac{12 \sum (R_j - 1/2S^2(n+1))}{S^2(n^3 - n)}. \quad (4.11)$$

Можно показать, что при полной согласованности мнений экспертов, когда все ранжирования всех экспертов полностью совпадают, коэффициент конкордации равен единице. С другой стороны, при полном расхождении, сумма рангов объектов будет стремиться к среднему значению:

$$\bar{R} = S^2(n+1)/2, \quad (4.12)$$

а коэффициент конкордации будет стремиться к нулю и при четном $S(n+1)$ равняться нулю. Считается, что согласованность достаточна, как только коэффициент конкордации превышает значение 0,5.

Пример 4.6. Экспертиза проведена для оценки композиции внешнего вида переносных магнитофонов, подготовленных к выпуску тремя радиозаводами. Ввиду сложности количественной оценки был применен метод строгого ранжирования. Семи экспертам независимо друг от друга были предъявлены 4 магнитофона, три вновь созданных и один лучший из выпускаемых. С целью исключения влияния недобросовестности экспертов наилучшая и наихудшая оценки суммы рангов в каждом столбце, не учитывались. При равенстве рангов исключалось только по одной наилучшей и худшей оценке (данные взяты в скобки). Результаты экспертизы сведены в табл. 4.12.

В результате обработки данных экспертизы можно сделать вывод, что магнитофон *Б* имеет наилучшую композицию внешнего вида, уже выпускаемый магнитофон *А* занимает последнее место. Чтобы подтвердить этот вывод, определим коэффициент конкордации, ис-

Результаты экспертизы

Эксперты	Магнитофоны			
	А	Б	В	Г
1	(4)	(1)	3	2
2	3	1	2	(4)
3	4	(2)	(1)	3
4	4	1	3	2
5	(1)	2	(4)	3
6	4	1	3	2
7	3	2	4	(1)
Σ рангов	18	7	15	12

пользуя (4.11). Значение коэффициента V равно 0,62, что свидетельствует об удовлетворительной согласованности.

Рассмотренные методы обработки экспертной информации не исчерпывают всех возможностей анализа. Методы постоянно совершенствуются, причем многие из них уже поддерживаются имеющимся программным обеспечением. В заключение параграфа повторим некоторые полезные рекомендации. Единственное, что нужно иметь в виду всегда, это то, что качество многомерно и модель качества иногда приходится упрощать, что приводит к ошибкам. Кроме того, источником ошибок является неверное использование шкал, при этом необходимо иметь в виду два правила:

1. Если сравнение объектов проводится по некоторой измерительной шкале, то использовать при анализе более информативную шкалу не нужно.

2. Сравнение двух объектов по выбранной измерительной шкале невозможно, если хотя бы один показатель определен по менее информативной шкале.

Отсюда следует вывод: *сравнение объектов и определение их показателей качества должно производиться по одной и той же измерительной шкале.*

4.4. Выбор эталона при экспертном оценивании

Одним из важных этапов подготовки экспертизы вообще процесса квалиметрической оценки является установление и выбор базового образца или эталона. Причем понятия базовый образец и эталон не всегда могут совпадать. Порой нельзя выбирать в каче-

стве эталона образец самого высокого уровня (лучший мировой образец), что приведет к непомерным затратам и может не соответствовать возможностям предприятия. С другой стороны, нельзя принимать в качестве базового образца образец низкого качества, так как это не будет стимулировать должных темпов роста. И то, и другое не соответствует общественным потребностям. Поэтому задача выбора эталонного или базового образца в квалиметрии носит сложный характер и весьма ответственна. При этом необходимо следовать простым правилам:

- образец не может быть признан базовым, если при равенстве единичных показателей качества, по сравнению с исследуемыми образцами, он обладает хотя бы одним показателем, худшим, чем у сравниваемого.

- из нескольких образцов, в ряду сравниваемых, остаются те, которые при равенстве единичных показателей имеют некоторые показатели лучше, чем у другого.

Выбор эталонного или базового образца включает следующие основные этапы:

- сбор и анализ данных о наиболее известных и рыночно продвинутых изделиях,
- выбор набора показателей для сопоставления,
- обоснование выбора базового образца из множества аналогов и выбор метода оценки.

Естественно, при этом должны учитываться такие факторы, как функциональное назначение, условия эксплуатации, принцип действия, группы потребителей и т.п. При этом должны использоваться методы комплексной оценки (разд. 2).

Базовые образцы делятся на три группы:

1. *Эталоны*, отражающие достигнутый уровень (в отрасли, стране, мире). Их основное назначение выступать в роли базового образца при оценке в процессе сертификации и присвоении категории.

2. *Эталоны*, отражающие перспективный уровень качества, носят опережающий характер и стимулируют прогресс (например задание по предельной норме выхлопа СО автомобилей на 2006 г.). Эти нормы используют при выдаче ТЗ, составлении технических проектов.

3. *Специальные эталоны*, предназначенные для решения частных задач определения и анализа динамики качества, сопоставления показателей.

Нельзя брать лучшие показатели у разных образцов продукции и стремиться создать что-то идеальное.

Правило: В качестве эталона должен утверждаться реальный образец, а в качестве базовых показателей – значения его показателей качества, т. е. сравнивается образец с образцом.

Утверждение эталона устанавливает масштаб по шкале отношений и делает возможным измерение качества в понятных мерах. В этом случае, какие-то показатели можно представить в виде рис. 4.2.

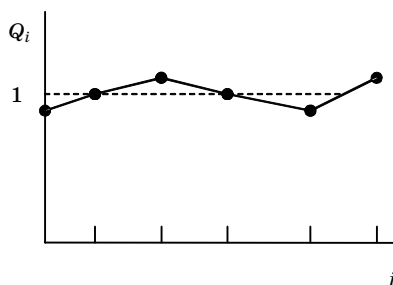


Рис. 4.2. Значение отдельных показателей

Таким образом, значение комплексного показателя качества эталонного образца выступает в роли безразмерной единицы, с которой сравниваются свойства продукции. Если часть относительных показателей больше, а часть – меньше, то относительные показатели объединяют в обобщенный комплексный показатель образца, сравниваемый с показателем эталона.

Примечание: Если абсолютные и относительные показатели объединяются с одинаковыми весами и по одним правилам, то порядок их ранжирования не меняется. Часто большое число комплексированных показателей снижает информативность отдельных сторон качества (нормативный, технический, технико-экономический и так далее).

Пример 4.7. Оценить технико-экономический уровень новой модели по сравнению с базовой (табл. 4.13).

Таблица 4.13

Данные примера 4.7

№ п.п	Показатель	База	Новый образец
1	Годовая производительность	$20 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$
2	Время простоя	6%	3%
3	Стоимость	$50 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$
4	Затраты на ремонт	$4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
5	Прочие эксплуатационные расходы	$40 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$
6	Срок службы	3 года	12 лет

Годовой суммарный полезный эффект:

$$P_{\Sigma m} = 20(1 - 0,06) = 18,8 \text{ тыс. деталей};$$

$$\Pi_{\Sigma_H} = 20(1 - 0,09) = 19,4 \text{ тыс. деталей.}$$

При сроке службы более одного года интегральный показатель качества $K_{и}$ рассчитывается по формуле

$$K_{и} = \frac{\Pi_{\Sigma}}{Z_c \cdot \Theta(t) + Z_э},$$

где Z_c – окупаемость капитальных вложений на создание продукции; $Z_э$ – ежегодные экспериментальные расходы; Θ_t – поправочный коэффициент; t – срок службы.

$$\Theta(t) = \frac{E_H(1 + \Sigma_H)^{t-1}}{(1 + E_H)^t - 1},$$

где E_H – нормативный коэффициент экономической эффективности, равный 0,15, для базы и новой модели.

$$\Theta(t)_б = 0,381; \Theta(t)_H = 0,16;$$

$$K_{и.б} = \frac{18,8}{50 \cdot 0,381 + 44} = 0,3 \text{ тыс. дет/р.};$$

$$K_{и.H} = \frac{19,4}{200 \cdot 0,16 + 22} = 0,33 \text{ тыс. дет/р.}$$

Таким образом, новый станок обладает улучшенными характеристиками, несмотря на гораздо большую начальную стоимость.

Использование интегральных показателей вызывает затруднение и в том случае, когда сложно определить величину полезного эффекта (предметы домашнего обихода, ювелирные украшения). В этом случае можно поступить следующим образом: условно принимаем качество эталона равным 1.

$$\Pi_{\Sigma Э} = Z_{C.Э} \cdot \Theta(t) + Z_{C.Б}. \quad (4.13)$$

У нового образца m свойств измеряются экспертами, а n свойств инструментально отличаются от эталона. Их можно учесть поправками $\Delta\Pi_i$ и $\Delta\Pi_j$ к полезному эффекту, тогда

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\Sigma Э} + \sum_{i=1}^n \Delta\Pi_i + \sum_{j=1}^n \Delta\Pi_j, \quad (4.14)$$

поправки находят из соотношений

$$\alpha_i = \frac{\Delta\Pi_i}{\Pi_{\Sigma Э}}; \quad \beta_j = \frac{Q_j}{Q_j - O_{jn}} \cdot \frac{\Delta\Pi_{jC}}{\Pi_{\Sigma}},$$

с их учетом

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\Sigma\mathcal{E}} \left(1 + \sum_{i=1}^m \alpha_i + \sum_{j=1}^n \alpha_i \frac{O_j - Q_{ji}}{Q_j} \beta_j \right), \quad (4.15)$$

если значение интегрального показателя $K_{\text{и}} = \frac{\Pi_{\Sigma}}{3_c \Theta(t) + 3_{\mathcal{E}}}$ больше единицы, то $Q > Q_{\mathcal{E}}$, если меньше, то $Q < Q_{\mathcal{E}}$.

Пример 4.8. Произведем сравнение двух домашних холодильников, данные о которых приведены в табл. 4.13. Новый холодильник имеет лучший дизайн (эстетика), эргономика улучшена за счет автоматического устройства оттаивания и удаления льда.

Таблица 4.13

Сравнительные данные (пример 4.8)

Показатель качества	Числовой показатель	
	Новый	Старый
Объем холодильной камеры, л	150	120
Объем морозильной камеры, л	16	11
Средний срок службы, лет	12	10
Стоимость, р.	5000	2000
Годовые эксплуатационные расходы, р.	18	15

Эксперты на основании выражений (4.13–4.15) установили, что эстетические показатели имеют весомость $\alpha_1 = 0,05$, а эргономические показатели весомость $\alpha_2 = 0,07$. Оценено, что увеличение объема холодильной камеры на 30 л приводит к численному значению коэффициента $\beta_1 = 0,6$, увеличение объема морозильной камеры на 5 л приводит к значению коэффициента $\beta_2 = 0,74$.

Решение. Суммарный полезный эффект старого холодильника равен

$$\Pi_{\Sigma \text{ ст}} = 2000 \cdot 0,173 + 15 = 361 \text{ р.},$$

нового холодильника с учетом α_i и β_i

$$\Pi_{\Sigma \text{ н}} = 361(1 + 0,05 + 0,07 + 30/120 \cdot 0,6 + 5/11 + 0,4) = 523,45 \text{ р.}$$

Интегральный показатель качества

$$K_{\text{и}} = \frac{523,45}{5000 \cdot 0,16 + 18} = 0,65.$$

Уровень нового холодильника на 35% хуже старого за счет экономических показателей, однако он выигрывает за счет новых свойств.

Измерение качества с помощью экспертных оценок позволяет решать многочисленные, разнородные задачи в промышленности, сфере услуг, торговле и так далее. Причем продукция разных предприятий несопоставима, но имеет общую характеристику – качество.

5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ В КВАЛИМЕТРИИ

5.1. Понятие интеллектуальной системы

Одним из основополагающих принципов системного подхода, который является одним из главных основ менеджмента качества [8], является принцип *симбиозности*. Следуя этому принципу, система должна строиться с учетом объединения в контуре управления естественного и искусственного интеллектов. При этом человек воспринимается как звено системы управления, играющее главенствующую роль. Человек создает концепцию системы, ее модель, анализирует их качество, принимает решения. Проникновение информационных технологий в процессы исследования, проектирования и управления РЭС изменило роль искусственного интеллекта, так как часто возникают ситуации, когда человек превращается в управляемое звено, принимая и перерабатывая решения, выданные искусственным интеллектом в процессе управления. Последовательная смена приоритетов человека и ЭВМ в процессе управления характерна для современного этапа использования информационных технологий. Очевидно, такая связь интеллектов должна поддерживаться специализированными языками общения человека и ЭВМ.

Под искусственным интеллектом, в общем случае, понимают способность ЭВМ решать такие задачи, которые ранее были под силу лишь многоопытному человеку или группе людей. Но это предполагает наличие у компьютера способностей понимать взаимосвязи между фактами анализируемого явления либо события и быть способным вырабатывать действия, ведущие к поставленной цели. Логично, что такая система должна обладать способностью к обучению и самообучению.

Работа вычислительной машины может варьироваться от той или иной степени приближения к действительному поведению моделируемой системы до почти точной его копии. Процессы в вычислительной машине можно также осуществлять в ускоренном или замедленном темпе по сравнению с процессами в моделируемой системе. Наличие искусственного интеллекта на фоне стремительного развития информационных технологий привело к появлению класса *интеллектуальных систем управления*. Под интеллектуальными системами (ИС), будем пом-

нимать адаптивные и обучаемые технические системы, созданные для расширения интеллектуальной деятельности человека или ее имитации в области оценивания и принятия решений. Классификация ИС будет приведена далее. На рис. 5.1 приведены основные составляющие ИС.



Рис. 5.1. Основные блоки интеллектуальной системы

Фирмы разработчики ИС поставляют заказчикам так называемые «оболочки или пустые» системы, имеющие начальное программное обеспечение и системы управления базами данных. Пополнение баз знаний и блоков объяснений, и логических решений производится разработчиками ИС совместно с пользователями, ориентируясь на конкретную предметную область.

Для вопросов, рассматриваемых в учебном пособии, наибольший интерес представляет одна из разновидностей ИС, а именно: автоматизированная экспертная система, выполняющая все функции (разд. 4), но с использованием возможностей ИС.

Экспертной системой (ЭС), принято называть систему искусственного интеллекта (ИИ), которая создана для решения задач в конкретной проблемной области.

Структура ЭС определяется следующими модулями (рис. 5.1):

– *базы данных* (БД), предназначенные для хранения исходных и промежуточных данных текущей задачи;

– *базы знаний* (БЗ), предназначенные для хранения долгосрочных сведений и правил манипулирования данными;

– *блок логического вывода решений – решатель*, представляющий собой набор программ, реализующих последовательность правил для решения конкретной задачи на основе информации, хранящейся в БЗ и БД;

– *блок приобретения знаний*, автоматизирующий процесс пополнения БЗ;

– *блок объяснений, рассуждений и коммуникаций*, формирующий пояснения о том, как система решала поставленную задачу;

– *система общения и коммуникации (интерфейса)*, ориентированная на организацию дружеского пользовательского интерфейса.

Работы по ИС начались с 50-х годов XX века (Тьюринг, Селфридж, Минский, Розенблат и другие). Разработка ИС стала возможной только при появлении новых информационных технологий (ИТ). При рассмотрении ИТ, используемых при анализе данных (как измерительных, так и экспертных), можно выделить три типа задач:

1. *Разработка новых языков* программирования (LISP, PROLOG, которые успешно заменяются сейчас C++, Visual BASIC).

2. *Системы управления БД – СУБД* (ввод, хранение, доступ). СУБД появились на ЭВМ 2-го и 3-го поколения гораздо раньше появления персональных компьютеров (Oracle, INGRES), но не стали стандартом для PC. Для PC наиболее распространены ПП Fox Pro и Paradox. При появлении сетей PC (распределенные базы данных) идеи, разработанные для суперЭВМ стали применимы и для сетей PC и в них стали применяться ПП Oracle высоких версий (Oracle 7, 8).

3. *Обработка данных* и получение на их основе новых знаний. Методы статистического анализа реализованы в сотнях пакетов прикладных программ (следует обратить внимание на MatLab v.6.). Эти пакеты можно разделить на несколько групп:

– Пакеты углубленного статистического анализа, ориентированные на специалистов (Systat, SAS, Statgraphics). Следует обратить внимание на сложность этих пакетов, так как они написаны специалистами по математической статистике для таких же специалистов. В силу этого они не могут быть рекомендованы для студентов не математических специальностей.

– Пакеты базовой статистики для широкого круга пользователей, обладающие дружественным интерфейсом, широко развитой си-

стемой подсказок и применяющие статистики, понятные большинству пользователей. В числе таких пакетов можно назвать MatLab и Statistics.

– Проблемно-ориентированные пакеты для конкретной области знания. Такие пакеты оформляются в экспертные системы, помогающие уточнить цель исследования, выбрать метод обработки данных, подобрать математическую модель. Пользование этими пакетами в обычном цикле обучения осложнено за счет использования специальной предметно-ориентированной терминологии и специальных статистик.

Итак, благодаря использованию ИС стал возможен качественный скачок в развитии методов управления в масштабах государства, отрасли, фирмы и отдельного человека. Любое логичное рассуждение, используемое менеджером, может быть закодировано, а следовательно, воплощено в ИС. Умение пользоваться современными ИС, или лучше модифицировать одну из существующих своих задач, позволит повысить уровень принимаемых решений.

5.2. Классификация интеллектуальных систем

Интеллектуальные системы можно условно разделить на три группы (рис. 5.2).

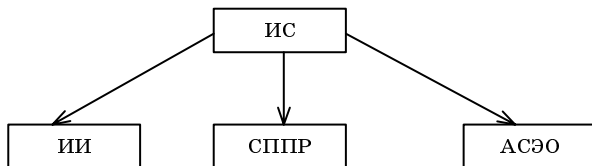


Рис. 5.2. Классификация интеллектуальных систем

1. Искусственный интеллект (ИИ) – задачи, связанные с решением проблем, в которых участвует интеллект:

- обработка сенсорных данных;
- создание сложных систем хранения и извлечения данных;
- обработка естественных языков;
- системы представления знаний (экспертные системы – ЭС).

(Примеры – нейронные сети PERCEPTRON, эвристический поиск – GPS, обучающие машины EURISKO). Более подробно мы рассмотрим ЭС.

2. Системы поддержки принятия решений (СППР)

3. Автоматизированные системы экспертного оценивания (АСЭО).

Рассмотрим указанные направления более детально.

5.2.1. Экспертные системы

Экспертные системы (ЭС) относятся к числу ИС, предназначенных для массового использования. Знания высококвалифицированного эксперта ложатся в основу ЭС, благодаря чему становятся достоянием широкого круга пользователей. Первые ЭС появились в медицине. Важной особенностью ЭС является то, что любая выданная рекомендация может быть объяснена. В подразд. 5.1 были упомянуты главные блоки ЭС, напомним, что это БД и БЗ, база программ (решатель), диалоговый компонент (интерфейс) и система объяснений. Остановимся подробнее на некоторых из них.

– *База знаний* обладает более широкими возможностями, чем БД, и она обладает возможностью пополнения. Однако БЗ является узким местом для ЭС и в целом для ИС. Причины [9]:

- экспертные знания слабо структурированы, их трудно формализовать, преобладают качественные и неопределенные факторы;
- разработка надежных количественных моделей, как правило, затруднена или невозможна;
- трудность переноса в БЗ значительного объема знаний эксперта в связи с их конкретным характером;
- необходимость процедур структуризации.

Создание ЭС тем не менее стало возможным благодаря разработке эвристического аппарата прямых и обратных цепочек рассуждений. При прямой цепочке рассуждения ведутся от данных к гипотезе, а при обратной от гипотезы, которую надо принять или опровергнуть, к данным. Прямая цепочка формирует вопросы к пользователю, обратная – вопросы, касающиеся одинаковых проблем, но без повторов. Наиболее удачные ЭС сочетают области подхода. Кроме того, появились способы работы с нечеткими множествами. (Основоположник лингвистических переменных Л. Заде 1976 г.). Совокупность нечетких предположительных вероятностных суждений может приводить к правильным заключениям. (Пример: ЭС – ЭКСПЕРТ – ИЗИ, база данных строится на примерах, с помощью которых идентифицируются представления и опыт эксперта. ЭС – МИЦИН – использует утверждения типа: если, ...-то, и коэффициенты уверенности от +1 до -1). Общеизвестно, что знания редкий и дорогой ресурс, поэтому необходимо разрабатывать более корректные методы извлечения и кодирования экспертных знаний. Единственное, что следует добавить, что уже создана высокопроизводительная ЭВМ Prolog-машина и ведутся работы по созданию языка для работы с логическим построениями.

– *Блоки интерфейса и объяснений*, позволяющие ЭС в любой момент объяснить, почему сделано то или иное заключение или вывод, представить пользователю цепочку рассуждений и фактов, приводящих к нему. Действия ЭС не должны носить необъяснимый характер, представлять «когнитивное окно для человека». (Пример с атомным реактором в Пенсильвании, когда система была излишне усложнена, и специалисты не могли определить нарушение).

Экспертные системы могут быть предметно-ориентированными и предметно-независимыми («пустыми»), т. е. представлять собой оболочку для предметного наполнения.

Экспертная система характеризуется набором признаков:

1. *Тип системы* (собственно ЭС, системы, основанные на знаниях без некоторых черт ЭС, расчетно-логические, комбинированные).

2. *Назначение системы*. ЭС могут предназначаться для решения задач оценивания, диагностики, обучения, выбора альтернативных вариантов решения.

3. *Степень предметной ориентации* (предметно-ориентированная, инструментальная, с помощью которой разрабатывается оболочка, пустая ЭС или оболочка).

4. *Форма представления знаний* (семантические сети, цепочки рассуждений).

5. *Используемый язык*.

6. *Степень дружелюбия*.

В настоящее время ЭС применяются во все время расширяющемся диапазоне. Непрерывно совершенствуются методы формирования баз знаний на основе:

1. Коллективных суждений при разработке зон *единодушия и конфликтов*.

2. При неполных и неопределенных знаниях, предполагающих контроль совместимости новых знаний с уже имеющимся в ЭС.

3. Порождения новых знаний как на основе знаний 1-го рода (книги, справочники, Internet), так и знаний 2-го рода (интуитивные соображения, логическое переосмысление знаний, имеющихся в ЭС без непосредственного обращения к эксперту).

4. Синтеза знаний (координатных – об аспектах и синтетических – о проблеме в целом и разработки условий их согласования. Тут возможно отметить три задачи:

Прямую – получение знаний о проблеме в целом по знаниям об отдельных аспектах и условиям согласования.

Обратную – по знаниям о системе в целом получать знания о подсистемах.

Согласования – решение прямой задачи при условии равновесия, компромисса и справедливости.

Возрастающая сложность ЭС ставит на повестку дня проблему создания сетей ЭС, самообучающихся баз знаний, создание иерархических гипертекстовых систем. Таким образом, ЭС – перспективный инструментарий во всех областях принятия решений.

5.2.2. Системы поддержки принятия решений

Если объект ПР четко структурирован, процесс функционирования описан моделью, имеется четкий критерий качества целевого функционирования, то такой объект оценивается методами теории исследования операций и нами не рассматривается.

Задачи управления качеством и, следовательно, квалиметрии относятся к области слабоструктурированных проблем, решаемых в условиях неопределенности. Поэтому практически невозможно отыскать единственное объективно наилучшее решение. Для ЛПР должен быть предложен инструментарий, использующий систему предпочтений и анализ альтернатив. Системы поддержки принятия решений (СППР) шаг к созданию новых информационных управленческих технологий. В частности, фирма Локхид уже более пятнадцати лет использует СППР для высшего руководства. Существует много определений СППР, дадим некое синтезированное определение:

СППР – универсальная экспертная система на базе набора программ решателя, предназначенная для информационной поддержки ЛПР в процессе принятия решения.

Существует естественная парадигма принятия решений:

а) определяется список всех возможных альтернативных вариантов действий;

б) проводится оценка последствий каждого действия путем установления вероятности тех или иных последствий и определением степени привлекательности для ЛПР;

в) рассчитывается ожидаемая ценность действия, как сумма ожидаемых ценностей всех его последствий;

г) в качестве решения выбирается действие, обеспечивающее наибольшую ожидаемую ценность.

В связи с тем, что оценка ценности или полезности носит субъективный характер, общая форма реализации этой парадигмы носит название субъективной ожидаемой полезности (СОП). Проблемы, возникающие при использовании СОП, типичны для различных задач, рассмотрим их коротко.

1. Процесс принятия решений при использовании СОП идет по пути «как люди должны принимать решение», а не как они прини-

мают решения на самом деле. Однако опыт применения СОП показывает, что в большинстве случаев она приводит к удаче.

2. Для конкретного ЛПП необходимо настраивать оценочную модель, отражающую систему предпочтений ЛПП (используя ретроспективу его прошлых решений). Такая процедура получила название *bootstaping* (натягивание сапога). На основе анализа определяется набор факторов, характеризующих степень привлекательности, для действий ЛПП и весомость факторов.

3. Анализ ситуации должен рассматривать все наиболее важные аспекты проблемы:

- а) полнота и достоверность информации;
- б) содержание элементов прогнозирования (определение динамики, изменение показателей, сценарий развития ситуации);
- в) реализация принципа непрерывности, обеспечивающего мониторинг изменения ситуации;
- г) своевременность принятия решения;
- д) определение степени риска.

Одним из главных направлений развития СППР является уменьшение неопределенности при принятии решений путем структуризации, характеристики и оптимизации:

1. *Структуризация* – определение элементов, взаимосвязей, иерархии подцелей, элементов, последовательности решения подзадач. В результате определяются исходные данные для подзадач и проблемы в целом, при этом могут корректироваться этапы структуризации.

2. *Характеризация* – объект характеризуется рядом свойств и признаков, каждое из которых может представляться в своей шкале. Проводится описание возможных состояний с характеристикой сочетаний признаков. Каждый признак можно упорядочить по его характерности для того или иного свойства.

3. *Оптимизация* – предмет многочисленных исследований. Анализируя многие подходы, можно определить последовательность человеко-машинных процедур формирования оптимизационных моделей принятия решений.

– Выделение существенных ограничений, позволяющих представить допустимые решения.

– Построение области вариации параметров, характерных для принятия решений при системной оптимизации.

– Формирование и выбор критериев оптимизации, с помощью которых определяются оптимальные значения параметров.

Чаще всего процесс принятия решений распадается на ряд подпроблем, описываемых частными оптимизационными моделями, т. е. при-

ходится иметь дело с упорядоченной последовательностью частных задач оптимизации.

Задача принятия решения усложняется, когда активно взаимодействуют несколько ЛПР, каждый из которых стремится к достижению своих целей. Здесь возникают проблемы компромисса и устойчивости. Могут помочь диалоговые распределенные системы (локальные или сети более высокого уровня), позволяющие приходить к компромиссу за счет нескольких итераций (ТЭЖ, транспортные системы).

Распределенные системы принятия решений находят все большее применение в самых различных областях управленческой деятельности. Отличие СППР от ЭС состоит в том, что в СППР значительную роль играет ЛПР.

Примеры СППР: СИАМА – определение сравнительной предпочтительности вариантов решения; ГРЕТА – работает с таблицами условий и действий; Pilot – наиболее продвинутая СППР, работающая с критериями различной природы и иерархией показателей.

5.2.3. Автоматизированные системы экспертного оценивания

Данный класс ИС обеспечивает самый высокий уровень автоматизации управленческой деятельности.

Таблица 5.1

Сравнение интеллектуальных систем

Тип ИС	Назначение	Основные задачи
ЭС	Использование специалистами среднего уровня	Диагностика, оценивание, рекомендации
СППР	Использование менеджерами, но не обязательно специалистами в предметной области	Обоснование решения для верхнего уровня, принятие решения для нижнего
АСЭО	Использование специалистами – экспертами по выработке управленческого решения	Подготовка БЗ и решателей для ЭС

В табл. 5.1 приведено сравнение ИС. Поскольку БД для ЭС готовится высококвалифицированными специалистами – экспертами, то наличие ЭС позволяет использовать ее специалистами среднего уровня знаний, т. е. значительно расширить область квалиметрического оценивания. Для грамотного принятия решений в рамках автоматизированных систем экспертного оценивания (АСЭО) необходима надежная, профессионально-полученная и корректно обработанная экспертная информация.

Укажем основные свойства АСЭО, отличающие ее от остальных ИС.

1. АСЭО – сложная многоуровневая система, позволяющая организовать проведение экспертизы от формирования целей до конечного результата и его анализа. При этом предусматривается взаимодействие экспертов, аналитической группы и программистов – операторов. Обязательным элементом является технологический граф организации и проведения экспертизы.

2. АСЭО позволяет осуществлять достаточно полную разностороннюю оценку высококвалифицированными специалистами, имеющими максимально возможное информационное обеспечение.

3. В АСЭО предусматривается оценка качества эксперта (априорная и апостериорная) и вычисление его рейтинга.

4. АСЭО дает возможность гибкого оценивания объектов экспертизы (фирма, подразделения, сотрудники), поэтому должна быть развитая настраиваемая оценочная система. Эта система должна включать набор критериев, их весомость, шкалы оценки, информацию и сравнимости критериев и так далее.

5. В АСЭО включаются автоматизированные рабочие места экспертов, позволяющие в интерактивном режиме осуществлять оценку объектов и настраивать индивидуальную оценочную систему.

6. В АСЭО проводятся и индивидуальные оценки, и коллективные. Причем в блоке пояснений содержатся алгоритмы получения результирующих ранжирований и тому подобная информация.

7. В АСЭО предусмотрен анализ результатов экспертизы.

Рассмотрим основные этапы создания АСЭО.

1. *Определение общего характера работы.* На основании сформулированной проблемы устанавливаются цели, пути решения, ожидаемые результаты, знакомство с существующими данными. Разработчик АСЭО может предлагать другие технологии, дополнительные постановки, поэтому существует взаимодействие между разработчиком и заказчиком (рис. 5.3).

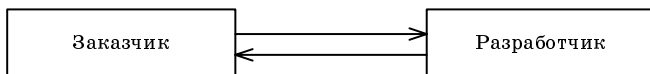


Рис. 5.3. Взаимодействие между заказчиком и разработчиком

После обсуждения проблемы и согласования основных подходов разрабатывается техническое задание на создание АСЭО.

2. *Определение сценария решения проблемы.* За счет нескольких итераций, создается блок–схема решения проблемы. Создаются структурные ячейки блок–схемы и на их основании строится техно-

логический граф решения проблемы, где событиями графа являются процедуры, частные задачи, алгоритмы, программы. Определяются режимы реализации каждого события графа: автоматический, интерактивный (диалоговый), ручной. Происходит согласование с заказчиком.

3. Определение программы работ. Выявляются теоретические проблемы, уточняется объем заимствований и новых разработок, задаются сроки и конкретные исполнители. Создается структура БД и БЗ, под них разрабатываются программы. Выдаются ТЗ на программирование входных, выходных форм и форм отчетности.

4. Выполнение программы работ. Общее руководство осуществляет генеральный конструктор системы, за разработкой и взаимодействием программ следит опытный системный программист. Решаются задачи контроля качества, определения оптимального распределения ресурсов.

5. Разработка системы тестов. Для каждого программируемого алгоритма необходимо разработать контрольный тест, проверяющий правильность работы программы во всех разветвлениях алгоритма при разных сочетаниях исходных условий. Необходим также контрольный пример, а точнее банк примеров. Возможно также построение системы тестов, проверяющих:

- точность приближенного решения;
- чувствительность к изменению исходных данных (робастность);
- оценку эффективности алгоритмов.

6. Аprobация рабочего варианта. Демонстрация заказчику с целью определения степени соответствия целям и задачам. Доработка системы после уточнений и корректив может также состоять из нескольких итераций.

7. Подготовка отчета. В окончательный отчет включаются:

- обзор существующих методов решения заданной или близких проблем;
- методы и алгоритмы, разработанные или используемые для решения;
- описание структуры;
- входные и выходные формы;
- инструкция для пользователя;
- описание примера решения проблемы и так далее.

Примером подобных систем является АСЭО – 1 «Выбор проекта». В системе осуществляется отсев менее значимых проектов, степень дублированности, предложения по агрегированию. Эта работа проводится каждым экспертом за счет стратификации (страта – слой),

т. е. отнесения к одному из фиксированных уровней предпочтения. Кроме того, предусмотрен диалог по определению системы предпочтений каждого эксперта за счет разбивки критериев на классы, определения важности критерия внутри класса. После определения системы предпочтений экспертов автоматически определяется сравнительное предпочтение.

Полученные этими двумя способами оценки сопоставляются. АСЭО – 1 предусматривает многотуровые экспертизы.

На основе АСЭО – 1 создано семейство более сложных АСЭО (АСЭО – 8, ЕХСО, СОМБИ – РС).

6. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ КВАЛИМЕТРИИ

6.1. Общие представления об имитационном моделировании

При представлении модели средствами математики и логики возникает абстрактный образ реального объекта, при исследовании образца реального объекта в качестве модели имеет место конкретное исследование. Таким образом, моделирование, в том числе и имитационное, находится в промежутке между этими двумя крайними точками (рис. 6.1).

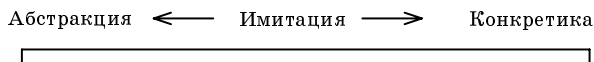


Рис. 6.1. Место имитационного моделирования в модельном пространстве

В результате модель из вспомогательного средства, заменяющего исследуемый объект (модель автомашины, портновский манекен), стала превращаться в способ получения информации о вновь создаваемой исследуемой или управляемой системе.

Подчеркнем, что под *информацией* будем понимать не столько продукт человеческого разума, получаемый в процессе познания, сколько объективную философскую категорию, связывающую темп процессов, происходящих в системе, с уровнем организации самой системы. Информация через философскую категорию *отражение* связана с категорией *материя* [4]. Под отражением понимается свойство материи воспринимать и сохранять в своей структуре следы воздействия другой системы. По А. Урсулу – информация – отраженное разнообразие реальности мира. Отсюда, чем полнее и разнообразнее модель динамической, нелинейной и неравновесной системы, тем более адекватно она отображает реальную систему. Вернемся к нашему представлению о моделях, полагая, что любой алгоритм это модель деятельности, а в силу системности Вселенной любая целесообразная деятельность невозможна без моделирования. Все сказанное в равной мере относится к задачам квалиметрии, а усложнение квалиметрических оценок приводит к необ-

ходимости применения методов моделирования, и, в первую очередь, компьютерного.

Классификация системного мира моделей весьма широка, поэтому на рис. 6.2 рассмотрена суженная классификация, отвечающая задачам настоящего раздела пособия.

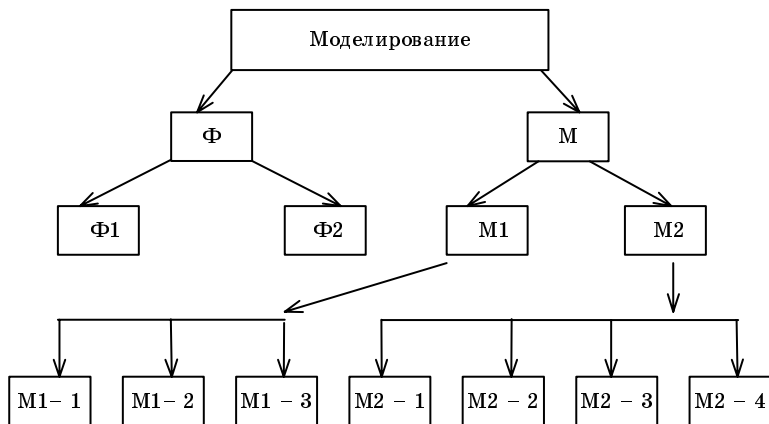


Рис. 6.2. Классификация методов моделирования

Дадим краткое пояснение классификации (рис. 6.2).

Φ – физическое (прямое) моделирование; $\Phi 1$ предусматривает использовать в качестве модели саму систему (опытный образец), а $\Phi 2$ – другую систему со схожей физической природой (макет автомобиля, сооружения, плотины). Такой вид моделирования способствует созданию теории подобия.

M – математическое моделирование, распадающееся на две большие группы $M1$ и $M2$.

$M1$ – аналитическое моделирование, которое можно разделить на $M1-1$ явное аналитическое описание искомых характеристик системы на одном из языков математики; $M1-2$ – приближенные численные методы, когда все объекты аппроксимируются числами или их комплектами в принятой числовой сетке, а результаты получаются в виде таблиц или графиков; $M1-3$ – качественные методы, когда изучаются свойства решений задач данного класса без нахождения самих решений. Зачастую эти методы реализуются с помощью экспертного оценивания. Такого вида методы широко используются в теории качества, квалиметрии, экономике, социологии и т. д.

$M2$ – компьютерное моделирование, когда математическая модель интерпретируется в программу для ЭВМ. Характерно, что с

момента появления статьи Дж. Неймана и С. Улама в 1948 г. – первой работы по применению метода Монте-Карло, многие специалисты продолжают называть компьютерное моделирование (КМ) методами Монте-Карло или статистических испытаний. Это, в принципе, неверно, так как КМ разделилось на 4 направления (рис. 6.2). $M2-1$ – методы Монте-Карло или методы вычислительной математики, использующие методы $M1-2$ с учетом возможностей современных компьютеров. Этими методами можно вычислять любуе, не берущиеся аналитическим путем, многократные интегралы, решать системы уравнений. Интересующимся методами вычислительной математики следует обратиться к многочисленной литературе.

– $M2-2$ – методы имитационного моделирования (*simulation*) (ИМ), для которых характерно воспроизведение на ЭВМ процесса функционирования системы с сохранением его логической структуры и последовательности его протекания во времени, что позволяет путем многократного повторения набрать необходимые статистические данные и судить о состоянии объекта в различные моменты времени, оценивать выходные характеристики, выбирать оптимальное поведение или проводить сравнение альтернативных вариантов.

– $M2-3$ – методы статистической обработки данных моделирования на основе методов планирования эксперимента. Имеется целый ряд хороших монографий, посвященных этим вопросам (Дж. Кляйнен «Статистические методы в имитационном моделировании»; А.Афифи «Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ». Указанные книги переведены на русский язык). Существующие пакеты ПП по математической статистике кратко описаны в подразд. 4.3.

– $M2-4$ – комплексы имитационного моделирования, объединяющие все названные виды КМ, пользовательский интерфейс, автоматизированные системы поддержки принимаемых решений и т. д. Это перспективное развивающееся направление предназначено для исследования сложных систем (подробнее см. [7]).

Усложнение исследуемых систем привело к резкому усложнению их математического описания, что, в свою очередь, приводило к необходимости делать всевозможные упрощающие допущения. При этом возникла опасность ухода от реального представления о системе. Выходом из этого положения являлся либо прогресс самих математических методов, либо изыскание иных методов описания. Появление мощных современных компьютеров и возникновение информационных технологий (ИТ) привело ко вто-

рому рождению математического моделирования (ММ). Оно стало вторгаться практически во все сферы человеческой деятельности. В ряде областей ММ стало вытеснять физическое моделирование, так произошло, в частности, в авиационной промышленности, где начался демонтаж аэродинамических труб. Дальнейший прогресс ММ идет за счет:

- Разработки новых численных методов решения задач моделирования, возможных только при условии использования ИТ.

- Стремительного увеличения объемов памяти и производительности ЭВМ, что позволяет на порядки увеличить размерности решаемых задач и перейти к качественно новым задачам моделирования.

Так, прогресс ММ позволил:

- исследовать эффекты *синергизма*, когда выходной эффект системы превышает действие, оказываемое компонентами по отдельности;

- оценивать бифуркационные состояния (вероятностное разветвление процесса функционирования системы);

- прогнозировать развитие диссипативных структур (переход в качественно новое состояние, характеризующееся более высоким уровнем самоорганизации);

- создавать более совершенные модели развития Вселенной (большой взрыв, горячая Вселенная, теория струн), теории искусственного интеллекта, модели в теории качества, квалиметрии, социологии, экономике и т. д.

В то же время возникла мощная оппозиция применению ММ в плохо структурируемых, не формализуемых областях, т. е. в таких областях, где человек (оператор, ЛОР, ЛПР) является основным элементом. Это в полной мере относится к экспертному оцениванию (см. разд. 5). По определению академика РАН РФ А.А. Самарского процесс ММ базируется на триаде «модель – алгоритм – программа». До появления ЭВМ основную роль играла модель в виде математических уравнений, а алгоритм представлял собой схему ручных расчетов для приближенного решения уравнений, программа отсутствовала вообще. В начале использования ЭВМ первого поколения программе отводилась второстепенная роль – представление алгоритма в машинных кодах. Развитие ИТ привело к тому, что ЭВМ стали использовать для моделирования процессов функционирования системы, причем в этом случае имелись алгоритм и программа, а математическая модель в ее классическом виде практически отсутствовала или молчаливо предполагалось, что математической моделью является одно из аналитических представлений (рис. 6.3). Это направление получило название имитационного моделирования и представ-

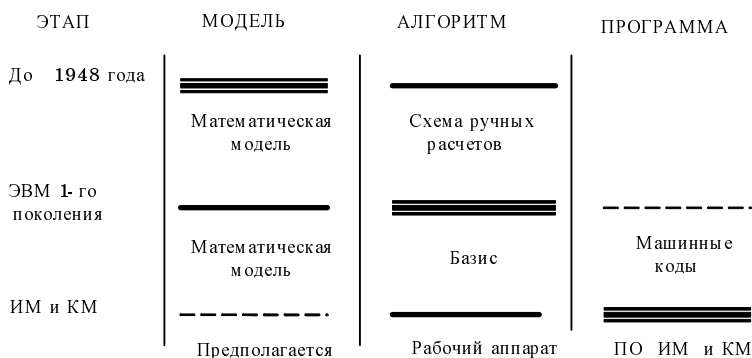


Рис. 6.3. Развитие концепции «Модель – алгоритм – система»

лено в работах Н. П. Бусленко, Н. Н. Моисеева, Р. Шеннона и многих других. Таким образом, в ММ началось опережающее развитие третьей компоненты триады – программы или программного обеспечения процесса моделирования.

Необходимо четко понимать разницу между программированием и моделированием. Программирование в настоящее время располагает большим арсеналом:

- средств автоматизации управления вычислительными ресурсами;
- языков программирования;
- средств создания программ;
- средств автоматизации работ с большими массивами данных – СУБД.

Однако весь этот арсенал направлен на создание программ, но модель не должна превращаться только в программу, описывающую абстрактные алгоритмы или логические отношения. Компьютерная модель должна оставаться, прежде всего, моделью реального объекта, независимо от того чем описывается его поведение: набором формул или правил, графиком или прогнозными оценками экспертов. Поэтому модель должна допускать исследование всех интересных возможностей, таких как: анализ чувствительности, изменение выходных характеристик, определение областей устойчивости и степень робастности; оптимизацию параметров, оценку вариантов построения, выбор альтернатив и т. д. В связи со сказанным, все чаще в литературе появляется термин – *компьютерное моделирование* (КМ). Компьютерное моделирование объединяет достижения математического моделирования, системного программирования и информационных технологий.

Приведем некоторые характерные черты КМ, инвариантные к области применения и направлениям исследования. Итак, КМ обладает:

- способностью понимать, интерпретировать и использовать формализованную и неформализованную информацию (математические формулы, логические правила, вербальные описания и т. п.);

- различными формами представления данных и знаний, заполняя пространство между ММ с его аналитическими формами описания и искусственным интеллектом с его формами и правилами представления знаний;

- способностью участвовать не только в процессе автоматизации научных исследований за счет использования самой ЭВМ для модификации различных режимов применения КМ, но и в процессе интеграции всех этапов жизненного цикла системы путем использования быстро развивающихся методов ИТ (широко распространенные во всем мире CALS-ИПИ – технологии, CASE – технологии, технологии ICAM, IDEF, ERP, EMP и т.п.);

- возможностью расширения круга пользователей: от узкого круга специалистов математиков и профессиональных программистов до большого класса исследователей, не обладающих профессиональными знаниями в областях математики и программирования, но хорошо знающих предметную область и умеющих обращаться с ППП.

Для целей квалиметрического оценивания используются все названные направления КМ. В настоящем пособии рассмотрим только некоторые возможности имитационного моделирования.

Имитационное моделирование позволяет решать ряд сложных задач и имеет преимущество:

- при создании модели объекта законы функционирования системы могут быть неизвестны, поэтому постановка задачи исследования является неполной и ИМ служит средством изучения особенностей процесса; при этом можно руководствоваться связями между компонентами и алгоритмами их поведения;

- при проведении ИМ выявляется характер связей между внутренними параметрами системы и выходными характеристиками;

- при проведении ИМ можно менять темп моделирования: ускорять при моделировании явлений макромира (например, процессов на Солнце) или замедлять при моделировании явлений микромира (например, процесс существования элементарных частиц);

- при проведении сравнения и выбора альтернатив;

- при изучении узких мест в системе;

- при подготовке специалистов, осваивающих новую технику.

Из перечисленного следует, что ИМ применяется для решения широкого спектра задач практически любой сложности в условиях неопределенности, когда аналитическое моделирование оказывается практически не применимым.

Достоинства ИМ:

1. Возможность объединения традиционных математических методов и экспериментальных компьютерных методов.

2. Высокая эффективность применения при исследовании АСНИ, САПР, экспертных систем, сложных систем управления. По данным RAND Corp. консалтинговые фирмы из всей гаммы возможных средств анализа: линейное, нелинейное, динамическое программирование, методы исследования операций, вычислительные методы, более чем в 60 % случаев прибегают к ИМ, так как ИМ позволяет получать ответы в терминах, понятных и привычных для пользователя.

3. Возможность исследования объектов, физическое моделирование которых экономически нецелесообразно или невозможно.

4. Испытание объекта связано с опасностью для здоровья человека.

5. Исследование еще не существующих объектов.

6. Исследование труднодоступных или ненаблюдаемых объектов.

7. Исследование плохо формализуемых экологических, социальных или экономических систем.

8. Исследование объектов практически любой сложности при большой детализации и снятии ограничений на вид функций распределения случайных величин.

Недостатки ИМ:

1. Самым существенным недостатком является невозможность получения точечной оценки исследуемых характеристик, так как в результате ИМ можно оценить только математическое ожидание и дисперсию.

2. Трудности оптимизации, так как ИМ отвечает на вопрос что будет в случае «если...», но не определяет будут ли эти условия наилучшими.

3. Потеря общности результатов, так как в процессе ИМ оценивается конкретная система.

4. Существуют трудности с оценкой адекватности ИМ.

5. Создание ИМ сложной системы длительно по времени и требует значительных денежных средств.

Несмотря на эти недостатки, все большее число исследователей прибегает к использованию ИМ в силу указанных достоинств. Кро-

ме того, ряд недостатков может быть исключен или уменьшен за счет правильной организации процесса ИМ и применения некоторых специальных методов. Уменьшение первых двух недостатков, актуальных при квалиметрических оценках, в том числе при обработке получаемой статистики с помощью ИМ, описано в следующих подразделах. Эти недостатки затрагивают вопросы повышения точности оценок и изучения путей приближения к оптимальному (или точнее к рациональному) варианту построения исследуемой системы.

Повысить точность оценок можно за счет:

- выбора параметров входных потоков случайных событий и потоков их обслуживания, адекватных функциям распределения случайных величин в реальной системе;

- планирования проведения вычислительного эксперимента;

- уменьшения дисперсии оценок за счет специальных мероприятий.

Приближение к рациональному варианту построения системы можно осуществить при выполнении следующих процедур:

- выяснения установившегося значения показателей за счет исключения переходного периода;

- выбора наилучшей альтернативы в паретовском множестве.

6.2. Пути снижения дисперсии квалиметрической оценки

Задачи получения базовых случайных величин (БСВ), векторов и функций, являющихся залогом эффективного процесса ИМ, рассмотрены в монографиях автора [5, 7]. Стандартные вопросы длительности ИМ, оценки средних значений, оценки разности средних значений, выбора наилучшего варианта по среднему значению и дисперсии при некоррелированных входных воздействиях изучены в последней монографии автора по имитационному моделированию с помощью языка ИМ GPSS/H v.2001.[7]. Поэтому далее более подробно рассмотрим метод использования встречных потоков БСВ, называемых Т. Шрайбером «методом антитез».

Общая идея метода антитез

При проведении процесса ИМ одним из мощных методов уменьшения дисперсии при одинаковом объеме выборки или уменьшения объема выборки без потери точности является использование встречных или дополняющих потоков БСВ, в дальнейшем будем называть их *антитезами*. Теория математической статистики жестко связывает уменьшение стандартного отклонения с объемом выборки, так увеличение объема выборки в 4 раза приводит лишь к двукратному уменьшению стандартного отклонения. Однако использование ан-

титез позволяет нарушать каноны теории. Существует ряд способов понижения дисперсии при проведении ИМ, перечислим их без проведения сравнительного анализа (заинтересованному читателю можно рекомендовать монографию И.М.Соболя «Метод Монте-Карло»):

– *Стратифицированная выборка*, когда данные разбиваются на непересекающиеся страты, попадание средней оценки в одну из страт позволяет не рассматривать другие. Мощность оценки будет зависеть от абсолютной разности между средними значениями страт.

– *Значимая выборка*, когда вводится новая функция плотности, задающая большие веса значениям тех параметров, которые вносят наибольший вклад в значение выходных характеристик на основе принципа Парето 80:20. Автор в ряде своих публикаций [5, 6] ввел понятие коэффициента значимости, которое с успехом применяется при аналитических расчетах и может быть полностью использовано в процессе ИМ.

– *Начальная выборка*, когда исследователь располагает данными пилотных прогонов, данными по испытаниям аналогичных систем и т. д. Такое моделирование называется моделированием, управляемым по предыстории.

– *Комбинированная выборка*, когда используются аналитические модели, например формула Литтла $L = \lambda T$, связывающая ожидаемое число заявок в системе (транзактов) – L со временем их пребывания в системе – T при параметре потока заявок – λ . Средством понижения дисперсии в данном случае является использование известных значений параметра потока.

Однако по мнению автора самым эффективным и удобно применяемым в GPSS/H является метод антитез. Название введено Т. Шрайбером и представляется наиболее удачным из названных.

Рассмотрим суть метода антитез. Формируются пары реплик, и по значениям этих реплик вычисляется среднее значение пары. Вместо обычного требования независимости реплик используется отрицательная корреляция, т. е. максимально возможному значению одного члена пары соответствует минимально возможное значение, допустимое в этой серии опытов и наоборот. Проиллюстрируем эту идею на примере бросания двух игральных кубиков. Результаты – прямые значения бросания с частотой их появления и антитезы этих прямых бросаний показаны в табл. 6.1. Очевидно, что максимальным значением в данном примере является 12 (выпадение двух граней по 6), а минимальным является 2 (выпадение двух граней по 1), и тогда эти значения составят первую пару. Логика представления других пар аналогична.

Пары антитез при бросании 2 кубиков

Прямой результат	Антитеза	Частота	Среднее пар
2	12	1/36	7
3	11	2/36	7
4	10	3/36	7
5	9	4/36	7
6	8	5/36	7
7	7	6/36	7
8	6	5/36	7
9	5	4/36	7
10	4	3/36	7
11	3	2/36	7
12	2	1/36	7

В силу симметрии частота появления результатов в паре одинакова, сумма результатов в паре также одинакова, а, следовательно, и среднее значение пар одинаково и равняется 7. Теперь предположим, что мы хотим промоделировать бросание кубиков на ЭВМ. Можно ли заменить 10 реплик проведением 5 реплик с использованием антитез, ответ очевиден (табл. 6.1). Более того, можно утверждать, что в этом симметричном случае (при условии правильности кубиков) вполне достаточно проведения только одной реплики с использованием антитез! Табл. 6.1 должна привести грамотного статистика в состояние тихой ярости: статистические испытания проведены, а дисперсия равна нулю! Ведь при проведении независимых испытаний дисперсия равна $35/6$, т. е. почти 6. Очевидно, что в реальных ситуациях, а не в таком рафинированном примере, дисперсия не может быть равна нулю по определению, так как добиться абсолютной отрицательной корреляции вряд ли удастся. Известные специалисты Лоу и Келтон в своей классической работе по ИМ показали, что возможно снижение дисперсии на 60–65%. Очевидно, что и такого снижения вполне достаточно для практических целей, учитывая сокращение машинного времени и снижение дисперсии при одновременном уменьшении объема необходимой выборки! Отсюда следует, что можно использовать входные данные с большей дисперсией, чем это допустимо в случае независимости членов выборки. Интересно сравнить ре-

зультаты моделирования с использованием антитез с результатами использования обычного метода при независимости членов выборки. Для заданного числа реплик объем выборки с использованием антитез вдвое меньше стандартного метода. Причем машинное время на создание 20 независимых БСВ и 10 пар антитез одинаково, а сам процесс моделирования почти вдвое короче.

Однако вспомним постулаты теории математической статистики:

1. В случае малых выборок дальнейшее уменьшение выборки приводит к возрастанию t -статистики и пропорциональному расширению доверительного интервала.

2. Ширина доверительного интервала обратно пропорциональна корню квадратному из размера выборки, поэтому уменьшение объема выборки вдвое вроде бы никак не может привести к снижению дисперсии.

Рассматривая уменьшение выборки (в случае малых объемов выборки) вдвое при использовании антитез, можно заметить, что увеличение t -статистики оказывает влияние на уменьшение дисперсии, но не такое значительное как при применении независимых членов выборки. Этот вопрос является предметом специального рассмотрения специалистов по статистике и не рассматривается в пособии, однако читатель должен сделать важный для себя вывод, что применение антитез способствует снижению дисперсии, а на сколько, – зависит от конкретных систем. Теперь рассмотрим идею использования антитез на примере одноканальной, однофазной СМО. Предположим, что время поступления следующего транзакта меньше среднего времени, а время обслуживания предшествующего транзакта больше среднего, тогда поступающий транзакт будет ожидать обслуживания больше среднего времени ожидания. Тогда в паре антитез для второго члена все будет наоборот: время поступления больше среднего, время обслуживания предыдущего меньше среднего, а время ожидания становится меньше среднего. Следовательно, время ожидания больше среднего будет уравниваться временем ожидания меньше среднего и среднее время ожидания в паре будет близко к предсказываемому времени ожидания. В результате выборочная дисперсия таких пар уменьшается и можно рассчитывать на сужение доверительного интервала.

Способ получения антитез

Задачей получения антитез является стремление получить абсолютную отрицательную корреляцию выходных значений при использовании отрицательной корреляции БСВ в интервале $(0,1)$. Будем полагать с высокой степенью достоверности, что БСВ отрицательно

коррелированы с их дополнением до 1. Получение антитез продемонстрируем на возможностях пакета ЯИМ GPSS/H [5, 7).

Например, дополнением для 0.25 является 0.75, для 0.03 соответственно 0.97 и т. д. Значение, полученное с оговоренного генератора случайных чисел (ГСЧ), используется как прямое значение, а затем оно же преобразуется в дополнение, чтобы использоваться в обратном потоке инверсированных чисел. Очевидно, что получение выходных значений с отрицательной корреляцией при отрицательной корреляции БСВ справедливо для симметричных функций распределения, для несимметричных же функций, к каким относится экспоненциальное распределение, коэффициент корреляции равен 0,64. Отсюда следует заключение, что выходные значения не обладают абсолютной отрицательной корреляцией даже при абсолютной отрицательной корреляции БСВ. Преобразование входных отрицательно коррелированных БСВ в выходные отрицательно коррелированные значения достаточно длительный и сложный процесс, который в пособии не рассматривается. Рассмотрим только внешние команды управления, с помощью которых GPSS/H производит получение антитез. Случайное число антитеза получается с любого номера ГСЧ при использовании оператора управления (ОУ) RMULT [7], записью в одном из операндов числа со знаком минус, например

- а) прямые числа RMULT 25000,50000;
- б) антитезы RMULT -25000,-50000.

В примере заданы установки для ГСЧ1 и ГСЧ2 в случае а) и для антитез с тех же генераторов в случае б).

Необходимо подчеркнуть, что использование прямого потока БСВ и антитез должно быть обязательно согласовано, так, если какое-либо значение с любого ГСЧ используется для получения времени поступления транзакта в прямом потоке БСВ, то эквивалент антитеза должен использоваться для описания этого же транзакта во встречном потоке. В случае независимости реплик можно использовать один и тот же генератор для получения и времени поступления, и времени обслуживания, если то же самое сделать при использовании антитез, получится не синхронизированное наступление событий и задача становится некорректной. Поэтому при использовании метода антитез обязательным условием является применение разных ГСЧ для получения времени поступления и времени обслуживания. При наличии в модели нескольких операторов блоков (ОБ) GENERATE и ОБ ADVANCE для каждого из них **обязательно** используется свой ГСЧ. Выполнение этого неперемного условия позволяет осуществить синхронизацию потоков событий.

Подобное разделение ГСЧ необходимо неукоснительно соблюдать при задании встроенных в пакете законов распределения, а также задаваемых дискретных и непрерывных функций. Следует учитывать, что назначение генератора не всегда может решить все проблемы, например, представим вполне реальный случай, когда транзакт не может дожидаться в очереди и покидает систему не обслуженным. Метод антитез в этом случае может привести к появлению ошибки, и такую возможность необходимо учитывать в структуре модели.

При использовании метода антитез стартовая позиция ГСЧ для прямого и обратного потока должна быть одинаковой. Однако в случае прекращаемых испытаний, число входов в систему бывает больше, чем контрольное число терминированных транзактов и таким образом, итоговое значение ГСЧ не будет являться стартовым для новой пары антитез. Решить эту проблему можно установлением стартового значения ГСЧ до начала каждой реплики, установление новых значений для каждой реплики достигается путем введения в поле операндов ОУ RMULT арифметических выражений, которые для антитез заключаются в скобки, перед которой ставится знак «минус». Напомним, что при постоянстве использования ОУ RMULT после запятой операнда ставится знак `()`, свидетельствующий о продолжении записи, тогда при компиляции ищется следующая запись для этого же ОУ. Это объясняется и длиной записи в поле операндов, чтобы не делать строку слишком большой и оставить место для комментариев, а также с целью достижения большей наглядности записи. Составление арифметических выражений в поле операнда не оговорено какими-либо правилами и зависит от опыта и предпочтений пользователя, а также от навыка написания программ в других языках программирования, поскольку правила написания арифметических выражений идентичны Фортрану, Паскалю, СИ++, Бейсику и т.п.

6.3. Выбор наилучшей альтернативы в Парето-оптимальном множестве

Решение проблемы выбора наилучшей альтернативы при рациональном построении исследуемой системы является сложной, многоэтапной и многокритериальной задачей. Многие авторы занимались и продолжают заниматься решением отдельных аспектов этой проблемы. В принципе для решения оптимальной задачи необходимо иметь неограниченные ресурсы, тогда можно решать двуединую задачу оптимизации: либо максимизировать значения

выходных характеристик, либо, сохраняя выходные значения на заданном уровне, минимизировать ресурсы. Чаще всего на практике невозможно располагать неограниченными ресурсами и приходится решать задачу максимизации выходных характеристик системы – Q_f при ограниченных ресурсах – R . Такие решения некорректно называть оптимальными. Поэтому, имея ограниченные ресурсы, правильнее говорить о рациональных или субоптимальных решениях, которые и будем рассматривать (подразд. 2.1). Применяя методы ИМ, можно с помощью метода бенчмаркинга селективировать альтернативные варианты построения системы, оценивая их по возрастанию выходных характеристик. Напомним, что процесс ИМ не позволяет давать точечных оценок, а оценивает только средние значения, поэтому выбор лучшего варианта в Парето-оптимальном множестве должен основываться на статистических оценках, а именно на оценивании дисперсии. Далее рассмотрим варианты выбора решений в классических примерах некоррелированных и коррелированных альтернатив, а также метод, использующий D/D процедуру [7].

В процессе имитационного моделирования получаются не абсолютные оценки, а средние. Один из путей решения задачи нахождения различия между различными дисциплинами обслуживания при использовании теории массового обслуживания статистическим путем – это построение доверительного интервала для разности длин ожидаемых очередей при разных дисциплинах обслуживания.

Сравнение двух альтернатив с некоррелированными t -параметрами

Прямой метод сравнения двух некоррелированных альтернатив, когда оценивается разность ожидаемых значений, состоит в следующем:

1. Получается равное число реплик n для обеих альтернатив.
2. Составляются пары реплик одного номера из каждой альтернативы.
3. Вычисляется разность для каждой пары, а затем определяются среднее значение и стандартное отклонение разности.
4. Вычисляется доверительный интервал для разности при разных значениях доверительной вероятности. Если доверительный интервал не включает точку нуля, то можно предполагать (при выбранной значимости в процессе распознавания гипотез), что выходные величины будут отличаться от ожидаемых величин. Если интервал включает точку нуля, то есть основание полагать, что выходные значения не отличаются от ожидаемых величин.

Будем считать, что реплики независимы не только в рамках одной альтернативы, но и между альтернативами. Если на основе шага 4

выбираем доверительную вероятность 95%, то это значит, что гипотеза о том, что разницы между двумя ожидаемыми значениями нет, будет отвергаться на 5%-уровне значимости (см. Прил. 2). Кроме идентичности реплик необходимо помнить, что должно выполняться требование идентичности функций распределения. Напомним, что при малых выборках разность между парами должна иметь нормальное распределение, и тогда для вычисления доверительного интервала можно применить распределение Стьюдента. В нашем случае сравнение двух некоррелированных выборок можно заменить оценкой одной выборки, включающей разность этих выборок.

Сравнение двух альтернатив с коррелированными t -парами

Иногда в целях увеличения контраста при сравнении двух альтернатив используется идея применения рассмотрения положительно коррелированных пар. Особенно это важно при рассмотрении влияния на функционирование моделируемой системы измеримых и неизмеримых параметров. Тогда контролируемые параметры выделяются в одну группу, а не контролируемые замораживаются, чтобы они не оказывали маскирующего влияния.

В качестве примера рассмотрим стартовую зарплату выпускников технических специальностей в 2000 г. Ожидается, что женщины получают зарплату ниже, чем мужчины, и этот факт необходимо проверить сравнением с помощью оценки выборки. Кроме того, необходимо учитывать такие факторы, как качество самого вуза, уровень жизни в рассматриваемом регионе, среднюю зарплату по региону, суммарный балл выпускника, принимаемые за неконтролируемые признаки. Поэтому стартовая зарплата является случайной величиной и трудно оценить влияние полового признака на фоне других неконтролируемых признаков. Один из способов избежать влияния неконтролируемых факторов – использование *связанных* или подобранных пар. Предположим, что взята независимая выборка по женщинам – выпускницам 2000 г. и каждому члену выборки подбирается значение зарплаты мужчины, окончившего тот же или одинаковый по рейтингу вуз, с примерно одинаковым значением среднего балла. Таким образом, создаются связанные пары, для которых заблокировано воздействие уровня жизни в регионе и средней зарплаты в регионе. При вычислении разности зарплат влияние заблокированных факторов будет нивелировано. При использовании таких связанных пар вводится положительная корреляция между членами каждой связанной пары. Главной задачей при этом является уменьшение вариабельности получаемых разностей, что позволит более качественно про-

известии оценку исследуемых альтернатив. Использование анти-тез позволяет уменьшить значение дисперсии, но при этом реализуется отрицательная корреляция членов одной генеральной совокупности. В данном случае необходимо получить положительную корреляцию пар, принадлежащих разным генеральным совокупностям.

Схема двухэтапной Д/Д процедуры

Нами был рассмотрен выбор лучшей из двух альтернатив, когда выбор ограничен, как в случае двух дисциплин обслуживания, и трудно предложить еще какое-либо альтернативное решение. Однако на практике таких альтернатив может быть значительно больше и всегда возникает желание найти решение, близкое к оптимальному или лежащее в Парето-оптимальном множестве. Аналитическая идея двухэтапной процедуры поиска лучшей альтернативы из k существующих была доложена Дадевичем и Дадалом (Д/Д – процедура) в 1975 г. на математическом симпозиуме в Цинциннати, а затем более подробно представлена в монографии *Dudewicz E. J. Modern Mathematical Statistics, John Wiley, NY, 1988*. Эта Д/Д процедура прекрасно используется при моделировании на GPSS/H [7].

Рассмотрим вначале аналитическую схему Д/Д процедуры, а затем пример ИМ в случае 4 переменных.

Рассмотрим основные шаги Д/Д процедуры.

1. Получается два и более независимых значения, по каждой из сравниваемых альтернатив. БСВ, получаемые с одного ГСЧ в этом случае не применимы. В [7] рекомендовано на первом шаге получать не менее 15 реплик. Это является первым этапом Д/Д процедуры.

2. Вычисляются различные статистики, но в обязательном порядке выборочные среднее и стандартное отклонения.

3. Для каждой альтернативы проводятся дополнительные независимые испытания, количество испытаний варьируется от типа исследуемой задачи и может меняться от альтернативы к альтернативе. Это является вторым этапом Д/Д процедуры.

4. Для каждой альтернативы по результатам этапов 1-й и 2-й ищутся взвешенные статистики, причем объемы первой и второй выборки не обязательно совпадают.

5. Альтернатива с наибольшим или наименьшим (в зависимости от условий задачи) значением статистики признается лучшей.

Д/Д процедура оговаривает нормальность распределения выходных значений, но, что весьма важно, не требует равенства дисперсий выходных популяций. Опишем факторы, влияющие на вто-

рой этап Д/Д процедуры, а именно: определение размера второй выборки.

1. Влияние дисперсии выборки первого этапа.

Чем выше выборочная дисперсия на первом этапе, тем больше должен быть объем выборки второго этапа при прочих равных условиях. Поскольку выборочная дисперсия различных альтернатив различна, то объем выборки второго этапа для каждой альтернативы будет различным и прямо пропорциональным выборочной дисперсии первого этапа для рассматриваемой альтернативы.

2. Вероятность принятия правильного решения.

Поскольку мы имеем дело со случайными векторами в Парето-оптимальном множестве и пользуемся псевдослучайными числами всегда существует вероятность неверного выбора. Поэтому получаемые решения должны оцениваться задаваемым уровнем доверительной вероятности от 90% и выше. При этом очевидно, что чем больше уровень задаваемой доверительной вероятности, тем больший объем выборки второго этапа необходимо выбирать.

3. Уровень безразличия

Как при любом квалиметрическом оценивании исследователю необходимо задать уровень ошибки, ниже которого все результаты будут признаваться аналогичными. Так, выходными характеристиками может быть стоимость, производительность, потери, процент брака и т. д. Если, например, задать процент брака 0,5%, то уровень безразличия позволит считать хорошими системы с выходными характеристиками 99,5% и выше. Естественно, что стремление понизить уровень безразличия будет приводить к увеличению объема выборки. Вообще, чтобы быть точным, объем выборки второго этапа обратно пропорционален квадрату значения безразличия.

Из перечисленных факторов, очевидно, что определение объема выборки второго этапа является достаточно сложной проблемой. Приведем основные уравнения, которые используются на втором и четвертом шагах Д/Д – процедуры и будут использованы в примере 6.1.

Пример 6.1. Рассмотрим гипотетический пример ткацкой фабрики, на которой работает какое-то количество собственных станков, которые могут отказывать в процессе эксплуатации; для поддержания объема производства и для устранения дефектов, во-первых, арендуется дополнительный станок и, во-вторых, имеется несколько ремонтников. В табл. 6.2 представлены значения выборочных среднего \bar{x} и стандартного отклонения s для $x = 0,1$ арендуемых станков и $y = 1,2$ ремонтных рабочих на этапе первоначальной вы-

борки и значение статистик для 4-х альтернатив, выраженных в стоимости (в рублях).

Таблица 6.2

		x	0	1
		y		
1	\bar{x}		12833	14140
	s		1227	1439
2	\bar{x}		12490	12845
	s		242	555

Среди указанных 4 альтернатив необходимо выбрать такую, которая приводит к минимальной стоимости за день. Данные (табл. 6.2) получены при реализации 15 реплик для каждой из альтернатив, идея построения прослеживается в самой таблице. Полученные данные являются основой для получения размера выборки второго этапа при принятом уровне доверительной вероятности 95% и уровне безразличия 300 р. в день. Положим, что n_0 – начальный объем выборки первого этапа; N – общий объем выборки после добавления выборки второго этапа для каждой рассматриваемой альтернативы; $N - n_0$ – объем выборки, добавляемой на втором этапе. Тогда значение N определится из следующего выражения:

$$N = \max \{n_0 + 1, [(h_1 s / d)^2]\}, \quad (6.1)$$

где s – выборочное стандартное отклонение рассматриваемой альтернативы; d – уровень безразличия, одинаковый для всех альтернатив; h_1 – коэффициент, зависящий от:

- размера первоначальной выборки n_0 ,
- принятого уровня доверительной вероятности $P\%$,
- числа рассматриваемых альтернатив $k \geq 2$.

В табл. 6.3 приведены значения коэффициента h_1 с учетом всех названных факторов для восьми значений альтернатив k . (Более подробные таблицы приведены в монографии Дадевича 1988 г.).

В уравнении (6.1) прямые скобки [.] используются для указания, что «берется наименьшее целое значение, которое превышает или равно m ». Например, $[0,05] = 1$, $[31,8] = 32$ и т. д. Таким образом, в минимальном случае N больше n_0 на 1 и равняется $[(h_1 s / d)^2]$, если это значение превышает $n_0 + 1$. Например, если на первом этапе объем выборки принят равным 15, а $[(h_1 s / d)^2] = 31,9$, тогда объем добавляемой выборки равен $32 - 15 = 17$, при $[(h_1 s / d)^2] = 7,1$, тог-

да добавляется выборка второго этапа величиной 1 и суммарная выборка = 16.

Используя данные (табл. 6.3), вычислим объемы выборки для 4 альтернатив (табл. 6.2) при $P = 95\%$, $k = 4$, $n_0 = 15$, $d = 300$. Данные сведены в табл. 6.4, где числа внутри таблицы представляют значения выражения (6.1) $[(h_{1s}/d)^2]$ и через / добавляемый объем выборки второго этапа $N - n_0$, а значения x – число арендуемых станков, а y – число ремонтников.

Таблица 6.3

Значения коэффициента h_1 при разных факторах

P %	n_0	Количество рассматриваемых альтернатив k							
		2	3	4	5	6	7	8	9
90	15	1,93	2,39	2,63	2,81	2,93	3,04	3,12	3,20
90	20	1,90	2,34	2,58	2,75	2,87	2,97	3,05	3,12
90	25	1,88	2,32	2,55	2,72	2,84	2,93	3,01	3,08
90	30	1,87	2,30	2,54	2,69	2,81	2,91	2,98	3,05
95	15	2,50	2,94	3,17	3,34	3,46	3,57	3,65	3,72
95	20	2,45	2,87	3,10	3,26	3,38	3,47	3,55	3,62
95	25	2,42	2,84	3,06	3,21	3,33	3,42	3,50	3,56
95	30	2,41	2,81	3,03	3,18	3,30	3,39	3,46	3,53
99	15	3,64	4,04	4,27	4,43	4,55	4,64	4,73	4,80
99	20	3,54	3,92	4,13	4,28	4,39	4,48	4,55	4,62
99	25	3,48	3,85	4,05	4,20	4,30	4,39	4,46	4,53
99	30	3,45	3,81	4,01	4,14	4,25	4,33	4,40	4,46

Таблица 6.4

Объем выборки второго этапа

Номер альтернативы	1	2	3	4
Комбинация x, y	0,1	1,1	0,2	1,2
Значения $[(h_{1s}/d)^2] / N - n_0$	158,12 / 144	217,4 / 203	6,16 / 1	32,34 / 18
Среднее значение стоимости по 2 этапу, р.	13120	14235	12160	12920

Как видно из табл. 6.4, объем выборки второго этапа варьируется от 1 до 203 в зависимости от стандартного отклонения выбор-

ки первого этапа. Объем выборки второго этапа может быть уменьшен при уменьшении значения доверительной вероятности и/или увеличении уровня безразличия. После проведения испытаний с увеличенным объемом выборки подсчитывается среднее взвешенное значение (стандартное отклонение по выборке второго этапа не используется и поэтому может не рассчитываться). В последней строке (табл. 6.4) приведено среднее значение стоимости второго этапа, базирующееся на данных объема выборки, полученных в табл. 6.4.

Для каждой альтернативы, по выборкам первого и второго этапов, подсчитываются средние значения, которые затем взвешиваются и складываются. Вес W_0 для выборки первого этапа для каждой альтернативы подсчитывается на основе выражения

$$W_0 = (n_0 / N) \left[1 + \sqrt{1 - (N/n_0) \left[1 - (N - n_0)/(h_1 s / d^2) \right]} \right], \quad (6.2)$$

а значение весового коэффициента W_1 для выборки второго этапа каждой из альтернатив определится как $W_1 = 1 - W_0$.

В табл. 6.5 приведены значения весовых коэффициентов, подсчитанные из выражения (6.2) и значения средних стоимостей для каждой из альтернатив. Отметим, что для альтернативы № 3 «2 механика, 0 арендованных машин» коэффициент первого этапа оказался больше единицы, что привело к отрицательному коэффициенту на втором этапе, а это именно та альтернатива, объем выборки для которой увеличился всего на единицу. С доверительной вероятностью 95% наименьшая стоимость относится как раз к этой альтернативе, которая имеет стоимость 12565 р. в день и при заданном уровне безразличия должна быть выбрана как лучшая. Эта же альтернатива оказалась лучшей и по результатам оценки выборки первого этапа, однако этот факт совершенно не обязателен, чаще всего происходит как раз обратная ситуация, когда лучшая альтернатива на первом этапе может оказаться далеко не лучшей после добавления выборки второго этапа.

Таблица 6.5

Окончательные результаты выбора

Номер альтернативы	1	2	3	4
Комбинация x, y	0,1	1,1	0,2	1,2
Значения W_0 / W_1	0,116/0,184	0,082/0,918	1,243/-0.243	0,526/0,474
Взвешенная стоимость	13090	14277	12565	12878

В Прил. П. 5 представлен модельный файл для имитационного моделирования примера 6.1

С помощью имитационного моделирования можно решать многие задачи квалиметрического оценивания. К сожалению, эти работы только начинаются.

Контрольные вопросы

Вопросы к основной части пособия

1. Понятие квалиметрии. Разница между метрологией и квалиметрией.
2. Понятие сфер среды.
3. Типы моделей представления объектов.
4. Понятие «свойство» и его особенности.
5. Смысл диаграмм Мура и Кано.
6. Понятие «мера и размерность».
7. Структура потребностей.
8. Классификация видов квалиметрии.
9. Варианты относительной оценки качества.
10. Основные свойства характеристик качества.
11. Основные задачи процесса измерений.
12. Классификация измерений.
13. Органолептическое оценивание.
14. Различие между экспериментом и теоретической оценкой.
15. Понятие «статистическая шкала измерений»
16. Шкала классов эквивалентности.
17. Шкала классов предпочтения.
18. Структурная схема средства измерения.
19. Шкала интервалов.
20. Шкала отношений.
21. Сравнение статистических шкал.
22. Ряды предпочтительных чисел.
23. Разница между рядами Ренара и Е.
24. Смысл двуединой задачи оптимизации.
25. Понятие «Парето-оптимальное множество».
26. Оценка уровня неопределенности.
27. Необходимые условия при снятии неопределенности.
28. Источник ошибок при снятии неопределенности.
29. Виды квалиметрических оценок.
30. Необходимые входные данные при комплексной оценке.
31. Основные соображения, принимаемые при комплексной оценке.

32. Сравнение средневзвешенных оценок.
33. Понятие о коэффициенте значимости характеристик.
34. Методы оценки коэффициента значимости.
35. Этапы квалиметрической оценки.
36. Что необходимо учитывать при оценке ситуации?
37. Принципы построения дерева свойств.
38. Взаимосвязанность среды–человека–объекта.
39. Основные правила построения дерева свойств.
40. Порядок определения показателей.
41. Классификация показателей.
42. Факторы, влияющие на принятие решения.
43. Цикл принятия решения.
44. Точка принятия решения.
45. Оценка рисков при принятии решения.
46. Классификация критериев принятия решения.
47. Принятие решений при нечеткой информации.
48. Схема принятия решения при экспертном оценивании.
49. Виды экспертных процедур.
50. Основной смысл метода ДЕЛФИ.
51. Ошибки, возникающие при экспертном оценивании.
52. Методы статистического оценивания результатов экспертизы.
53. Основные правила выбора эталонов.
54. Классификация интеллектуальных систем в квалиметрии.
55. Структура экспертной системы.
56. Основные задачи информационных технологий при экспертном оценивании.
57. Признаки экспертной системы.
58. Системы поддержки принятия решений.
59. Автоматизированные системы экспертного оценивания (АСЭО).
60. Основные этапы создания АСЭО.
61. Место имитационного моделирования в описании объектов.
62. Виды компьютерного моделирования.

Вопросы по разделам приложения

63. Основные физические величины системы СИ.
64. Основные понятия математической статистики.

Заключение

Широкое развитие методов обеспечения и управления качеством не мыслится без использования методов квалиметрии. Естественно, что пособие дает только общее представление об идеях, подходах и методах квалиметрического оценивания. Применяя на различных этапах жизненного цикла изделия методы оптимизации показателей, прогнозирования будущего уровня, принятия решения и т. д., исследователь не отдает себе отчета в том, что он пользуется методами теории квалиметрии. Поэтому в заключение следует отметить, что при современном развитии науки о качестве нет необходимости обособлять и претендовать на исключительность теории квалиметрии. Только естественное сочетание методов системного анализа, теории вероятности и математической статистики, возможностей различных инструментов управления качеством, теории экспертного оценивания и т.п. позволит эффективно решать задачи менеджмента качества.

Основная цель настоящего пособия дать студентам специальности 340100 «Управление качеством» представление об общих возможностях квалиметрии, научить практическому применению методов оценки, нацелить на применение рассматриваемых методов в будущей практической деятельности и показать большие возможности квалиметрии в развитии и совершенствовании квалиметрических оценок.

Экспертные технологии уже нашли широкое применение в системах аккредитации, инвестиционных конкурсах, оценке финансовых рынков, банковских рейтингах, многочисленных задачах теории качества и так далее. Рассмотрим краткий перечень задач, возникающих перед менеджером при управлении сложными ситуациями.

1. Определение приоритетных направлений деятельности ЛПР.
2. Сбор, систематизация, классификация и анализ информации, как в процессе разработки и изготовления продукции, так и в процессе эксплуатации.
3. Анализ возникающих ситуаций и их сравнительная оценка.
4. Выработка альтернатив управления.
5. Оценка альтернатив и выбор лучшей из них.

6. Подготовка к выбору решения.

7. Принятие решения и определение механизма реализации.

8. Мониторинг динамики развития ситуации в ходе выполнения принятого решения.

Круг задач, конечно, гораздо шире, поэтому естественно, что нужны специальные технологии, чтобы избежать ошибок при оценивании и принятии решения. Основной частью новых, бурно развивающихся информационных технологий являются автоматизированные экспертные технологии и методы квалиметрии. Дадим ряд рекомендаций для будущей деятельности.

1. Целесообразно при решении квалиметрических задач пользоваться комплексными технологиями, т. е. сочетанием оценок, методов Делфи, имитационного моделирования и так далее.

2. Тщательно выбирать экспертов.

3. Корректно подготавливать всю начальную информацию.

4. Грамотно выбирать свойства и факторы, влияющие на развитие анализируемой ситуации.

5. Обоснованно применять необходимые статистические шкалы и методы обработки информации.

6. Согласовывать математические модели и входную информацию.

7. Разрабатывать сценарии развития ситуации с учетом или без учета управляющих воздействий.

8. Максимально автоматизировать количественные и качественные оценки, в том числе с использованием методов имитационного моделирования.

9. Создавать методы компьютеризированного коллективного экспертного оценивания.

Автор не претендует на полноту изложения, более того, он прекрасно понимает, что многие из рассмотренных в пособии вопросов, заслуживают рассмотрения в отдельных монографиях и учебных пособиях. В связи с этим, у читателя могут возникнуть различные предложения и замечания, которые будут восприняты автором с благодарностью.

E-mail <bnm@aanet.ru>

П1. Единицы международной системы СИ

Международной системой единиц СИ предусмотрено 7 основных физических величин, две дополнительные величины и производные величины. В приводимом списке после названия единицы большой латинской буквой дается размерность, затем наименование, затем русское и международное обозначение. Обозначения единиц помещаются в одной строке с числовым значением через пробел, без переноса на новую строку. Если используются специальные знаки ($^{\circ}$, %, ', ', ', $^{\circ}\text{C}$), пробел между значением и знаком отсутствует. При обозначении производных единиц нельзя комбинировать наименования и обозначения. Правильно – 80 км/ч, 80 километров в час; неправильно – 80км/час, 80 км в час. В скобках дано значения первичного эталона (ПЭ), принятого в системе СИ, а затем старый эталон (СЭ), действовавший до принятия системы СИ. В производных единицах вместо СЭ дается описание физического содержания единицы.

Основные единицы СИ

1. Длина L – метр, м, m. (ПЭ – 1650763,73 длин волн в вакууме излучения атома криптона 86 при переходе $2p_{10}$ и $5d_5$. СЭ – 1/10000000 1/4 Парижского меридиана).

2. Масса M – килограмм, кг, kg. (ПЭ – масса 1 дм³ чистой воды при температуре наибольшей плотности 4⁰С. СЭ – платино-иридиевый цилиндр 39х39 мм.).

3. Время T – секунда, с, s. (ПЭ – время, равное 9192631770 периодов излучения, соответствующее переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния цезия-133. СЭ – 1/86400 части средних солнечных суток).

4. Сила электрического тока I – ампер, А, A. (ПЭ – сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины).

5. Термодинамическая температура Θ – кельвин, К, K. (ПЭ – кельвин равен 1/273,16 части интервала термодинамической температуры между абсолютным нулем и тройной точкой воды. Тройная точка воды – точка равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах).

6. Сила света J – кандела (свеча – лат.), кд, cd. (ПЭ – сила света, испускаемого с площади 1/600000 м² сечения полного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101325 Па.

СЭ – свеча – это такая сила света, при которой яркость полного излучателя при температуре затвердевания платины равна 60 свечам на квадратный сантиметр).

7. *Количество вещества* N – моль, моль, mol. (ПЭ – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов углерода-12 массой 0,012 кг). Моль – расчетная величина и эталонов для ее воспроизведения не существует.

Примечание:

Наряду с указанными единицами допускается небольшое число единиц, применяемых вместе с единицами СИ.

- а) Тонна, гектар, литр.
- б) Минута, час, сутки, неделя, месяц, год.
- в) Единицы плоского угла.
- г) Температура С, F, R.
- д) Единицы относительных и логарифмических величин:

$$\lg \left| \frac{P_2}{P_1} \right| = 10 \text{ дБ}$$
$$\log_a (\ln, \lg, \log).$$

Дополнительные единицы СИ

1'. *Плоский угол* – радиан, рад, rad. (ПЭ – угол между двумя радиусами окружности с дугой, равной радиусу $57^{\circ}17'44,8''$).

2'. *Телесный угол* – стерadian, ср, sr. (ПЭ – телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, длина которой равна радиусу сферы).

Производные единицы СИ

Из производных единиц отметим наиболее важные для нас. Последние два обозначения показывают, как приводимая производная единица выражается другими единицами СИ и через основные единицы СИ.

1". *Частота* – герц, Гц, -, с^{-1} (частота периодического процесса, при которой за время 1 с происходит один цикл периодического процесса).

2". *Сила* – ньютон, Н, -, $\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$ (сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы).

3". *Давление* – паскаль, Па, Н/м^2 , $\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$ (давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2 и нормальной к ней).

4". *Энергия, работа, количество теплоты* – джоуль, Дж, Н·м, $\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$, (работа, совершаемая при перемещении точки приложения силы 1 Н на расстояние 1 м в направлении действия силы).

5". *Мощность, поток энергии* – ватт, Вт, Дж/с, $\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$ (мощность, при которой работа в 1 Дж совершается за время 1 с).

6". *Количество электричества, электрический заряд* – кулон, Кл, с·А, с·А, (количество электричества, проходящее через поперечное сечение при токе силой 1 А за время 1 с).

7". *Электрическое напряжение, электрический потенциал* – вольт, В, Вт/А, $\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$,

(электрическое напряжение на участке электрической цепи с постоянным током 1 А, в котором затрачивается мощность 1 Вт).

8". *Электрическая емкость* – фарада, Ф, Кл/В, $\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$ (емкость конденсатора, между обкладками которого при заряде в 1 Кл возникает электрическое напряжение 1 В).

9". *Электрическое сопротивление* – ом, Ом, В/А, $\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$ (сопротивление проводника, между концами которого при силе тока 1 А возникает напряжение 1 В).

10". *Электрическая проводимость* – сименс, См, А/В, $\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$ (электрическая проводимость проводника сопротивлением 1 Ом).

11". *Поток магнитной индукции* – вебер, Вб, В·с, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{м}^2$ (магнитный поток, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сечение проводника, проходит количество электричества 1 Кл).

12". *Индуктивность* – генри, Г, Вб/А, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2} \cdot \text{м}^2$ (индуктивность контура, с которым при силе постоянного тока в нем 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб).

13". *Магнитная индукция* – тесла, Т, Вб/м², $\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$ (магнитная индукция, при которой магнитный поток сквозь поперечное сечение площадью 1 м² равен 1 Вб).

14". *Световой поток* – люмен, лм, – , кд·ср (световой поток, испускаемый точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд).

15". *Освещенность* – люкс, лк, – , кд·ср·м⁻² (освещенность поверхности площадью 1 м² при световом потоке падающего на него излучения, равном 1 лм).

16". *Активность нуклида* – беккерель, Бк, – , с⁻¹ (активность нуклида в радиоактивном источнике, в котором за время 1 с происходит один акт распада).

17". *Доза излучения* – грэй, Гй, – , м²·с⁻² (доза излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж).

Примечание. В приложении приведены только те единицы, которые имеют либо собственные имена (метр, секунда, килограмм, люкс, кандела, радиан), либо которым присвоены имена известных ученых

(ампер, ватт, фарада, сименс, паскаль, ньютон и т. д.). Другие многочисленные единицы из различных областей техники имеют обозначения типа: концентрация, скорость химической реакции, тепловой поток и т. д. и выражаются через основные единицы, причем в разных источниках могут обозначаться разными символами.

П2. Основные понятия математической статистики

А. Понятие о функции распределения

Теория вероятности выводит свойства реального физического процесса из математической модели, т. е. определяет, какой процент интересующих наблюдений, находится в выборке.

Теория математической статистики устанавливает свойства математической модели на основании данных наблюдения, т. е. распространяет данные выборки на всю генеральную совокупность.

Статистика позволяет оценить случайность или закономерность проведенных измерений за счет *описания* массива экспериментальных данных, *оценивания* характеристик (моментов или статистик) массива данных и *принятия решений* на основе определенных статистик.

В теории математической статистики одним из основополагающих понятий является *выборка*, характеризующаяся объемом, функцией распределения членов выборки и правилами создания. Обычно стараются создавать репрезентативную (представительную) выборку, такую, когда любая комбинация из равного числа элементов генеральной совокупности имеет равную вероятность образовать выборку. Обычно отдельное значение случайной переменной обозначается через x , а ее реализацию через X . С этих позиций *генеральная совокупность* представляет собой множество всех возможных реализаций случайной переменной, а *выборка* представляет n - мерную реализацию, состоящую из n - исходов.

Каждая переменная x с определенной вероятностью может принять какое-либо значение, тогда *накопленное распределение вероятностей* $F(x)$, чаще всего называемое *функцией распределения*, может быть записано в виде

$$F(x) = P(X \leq x). \quad \text{П2.1}$$

В случае дискретной случайной переменной (количество дефектных деталей, количество обслуженных посетителей и т. п.) соответствие между x_i и вероятностью (относительной частотой) $f(x_i)$ представляется в виде полигона частот или гистограммы (см. П.3). Ломаная линия, соединяющая середины верхней части прямоугольников гистограммы, площадь под которой примерно равна единице, назы-

вается функцией вероятности или частотной функцией. Выражение для функции распределения может быть записано в виде

$$F(x) = \sum_{k_1} f(x_i). \quad \text{П2.2}$$

На рис. П2.1 дана иллюстрация гистограммы и полигона частот.

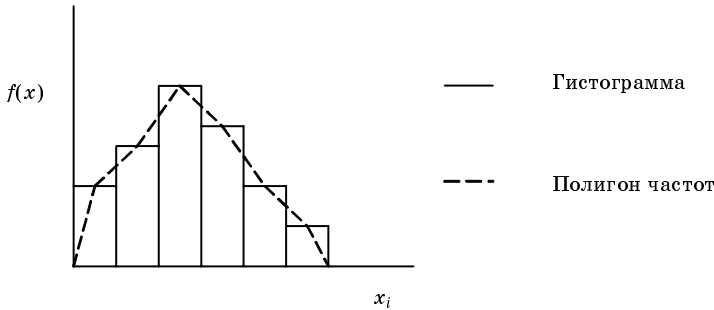


Рис. П2.1. Иллюстрация гистограммы и полигона частот

Для непрерывной случайной переменной функция распределения запишется в виде

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)dt = 1, \quad \text{П2.3}$$

где $f(t)$ плотность вероятности.

В том случае, когда необходимо рассмотреть изменение случайной переменной в интервале от a до b , выражение П2.3 примет вид:

$$P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a) = \int_a^b f(t)dt, \quad \text{П2.4}$$

т. е. вероятность события на этом интервале равна площади под кривой функции распределения в заданных пределах. Чаще всего, функция распределения, определяемая в пределах, носит название *закона распределения*. Подробнее о законах распределения следует читать в специальной литературе по математической статистике или в ППП «Статистика».

Подводя итог сказанному, следует запомнить, *что любая случайная переменная полностью определяется функцией или законом распределения!*

Однако при проведении эксперимента или квалиметрической оценки, когда получена начальная выборка, состоящая из какого-то чис-

ла данных (см. ПЗ.), нельзя судить о возможном распределении. Поэтому на основе полученной выборки следует оценить числовые характеристики (статистики) распределения вероятностей, называемые моментами E порядка k , которые представляют собой математическое ожидание M вида

$$E = M(X - x)^k, k = 1, 2, 3, \dots \quad \text{П2.5}$$

Следует иметь в виду, что для обозначения характеристик – генеральной (ГС) и выборочной совокупностей (ВС), применяются различные символы, которые представлены в табл. П2.1.

Таблица П2.1

Обозначения, применяемые для статистик ГС и ВС

Совокупность	Среднее	Дисперсия	Стандартное	Корреляция	Объем	Размах
Генеральная	μ	D, V	σ	ρ	N	–
Выборочная	\bar{x}	S, s_2	s	r	n	R

В соответствии с этими символами будут приводиться все дальнейшие обозначения.

В табл. П2.2 приведены основные статистики (моменты) для начальной оценки экспериментальных данных.

Таблица П2.2

Определение четырех моментов распределения

Моменты	Применимость	Статистика	Значение
$E1$	Меры положения	Среднее: – арифметическое, – геометрическое, – гармоническое. Медиана. Мода	Математическое ожидание среднего значения – M (см. подразд. 2.2) Срединное значение, квантиль 1/2 Максимум распределения
$E2$	Меры рассеяния	Дисперсия. Стандартное отклонение. Размах	Отклонение от M , $D = M(x - \bar{x})^2$ Корень квадратный из дисперсии $R = x_{\max} - x_{\min}$
$E3$	Меры формы	Асимметрия	Отсутствие симметрии, относительно нормального распределения – N
$E4$		Эксцесс	Различие между N и распределением x , плоско или островершинность

В задачах квалиметрии чаще всего применяются четыре непрерывных закона распределения: Муавра – Лапласа – Гаусса (нормальное или N -распределение; Стьюдента (Госсета)(t -распределение); Пирсона – Хельмерта (χ^2 – распределение); Фишера (F -распределение). Применимость этих распределений представлена в табл. П2.3.

Таблица П2.3

Применимость различных распределений

F	Назначение	Сходимость к N	Статистика $f(x)$
N	Описание членов ГС или ВС	–	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$
t	Сравнение средних значений ГС и ВС	Симметрично, похоже на N , зависит от ν , сходится к N при $\nu = 10$	$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}}$
χ^2	Сравнение дисперсий ГС и ВС	Зависит от ν , сходится к N при $\nu \geq 50$	$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2}$
F	Определение принадлежности разных выборок к ГС	Асимметрично, зависит от ν , сходится к N при специальных условиях	$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$

Нормальное распределение зависит от математического ожидания и стандартного отклонения, остальные три от числа степеней свободы (ЧСС), обозначаемой ν или r . Число степеней свободы статистически определяется числом независимых (свободных) наблюдений и равно объему выборки минус число статистик, оцениваемых по данной выборке, тогда

$$\nu = n - m, \tag{П2.6}$$

где m – число определяемых статистик. Чем меньше ν , тем сильнее отклонение от нормального распределения и хвосты распределений больше.

При увеличении номера момента число статистик возрастает, так при определении дисперсии таких статистик одна – среднее значение $\nu = n - 1$, при рассмотрении принадлежности двух выборок одной ГС $\nu = n - 2$ и т. д.

В последней графе табл. П2.3 приведены аналитические выражения для статистик.

Б. Статистические критерии

1. Статистическая надежность

Статистика, определяемая по выборке, является только средней оценкой искомого параметра ГС, которая должна быть дополнена интервальной оценкой, называемой *доверительным интервалом*. Его величина зависит от соответствующего коэффициента и позволяет судить насколько *надежно* высказывание, что интервал содержит параметр ГС. Вероятность попадания в интервал называется *статистической надежностью S*. Значение $1-S$ называется *уровнем значимости α* или *вероятностью ошибки или превышения уровня*. Вероятность непревышения уровня ошибки определится из выражения

$$P\left(\bar{x} - z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = S = 1 - \alpha, \quad \text{П2.7}$$

где $z = \frac{x - \mu}{\sigma}$, приводя нормальное распределение к стандартному, с

нулевым средним значением и стандартным отклонением, равным единице. Следует запомнить простое правило: *если n раз высказывается утверждение, что неизвестный параметр лежит в доверительном интервале, то, в среднем, следует ожидать αn ошибок!* В табл. П2.4 приведены значения доверительного интервала для четырех наиболее часто применяемых значений статистической надежности для стандартного нормального распределения.

Таблица П2.4

Значения интервала для N -распределения

Уровень значимости α	Статистическая надежность S	Доверительный интервал
0,1 = 10%	0,9 = 90%	$\bar{x} \pm 1,645\sigma / \sqrt{n}$
0,05 = 5%	0,95 = 95%	$\bar{x} \pm 1,96\sigma / \sqrt{n}$
0,01 = 1%	0,99 = 99%	$\bar{x} \pm 2,576\sigma / \sqrt{n}$
0,0027 = 0,27%	0,9973 = 99,73%	$\bar{x} \pm 3,0\sigma / \sqrt{n}$

Примечание: В последней строке таблицы приведены знаменитые $\pm 3,0\sigma$, перекрывающие 99,73% наблюдаемого числового ряда. Следует понять и запомнить, что ширина интервала тем больше, чем выше статистическая надежность!

2. Распознавание статистических гипотез

При попарном сравнении двух образцов продукции или двух объектов экспертизы, полученных разными способами или на разных производствах, всегда встает вопрос, какой из них лучше. Сравнить только средние значения нерационально, так как хвосты распределений могут наложиться друг на друга. При этом, решение принимается на основе статистических предположений (гипотез) о ГС с учетом разброса данных. Выбор правильного решения из двух противоположных предположений о ГС называется *статистической проверкой гипотез*. Информация при этом носит альтернативный характер, поэтому количественные оценки надо находить с помощью статистического оценивания.

Гипотеза о том, что две совокупности, с точки зрения одного или нескольких критериев, одинаковы, называется нуль-гипотезой – H_0 . Поскольку критерии устанавливают только отличие совокупностей, H_0 выдвигается для проверки основания ее отбрасывания и принятия альтернативной гипотезы H_A , указывающей, что расхождение между проверяемыми совокупностями есть. При проверке гипотез могут возникнуть два ошибочных решения: отклонение верной гипотезы с вероятностью α и принятие неверной гипотезы с вероятностью β . Подобный алгоритм представлен в табл. П2.5.

Таблица П2.5

Возможные исходы распознавания гипотез

		Ситуация	
		H_0 верна	H_0 не верна
Действие	Отвергнуть	α	$1 - \beta$
	Принять	$1 - \alpha$	β

Вероятности, соответствующие обоим исходам, в литературе носят различные названия при сохранении начального смысла:

– Вероятность отклонения правильной H_0 гипотезы – ошибка первого рода α , риск I, риск поставщика, риск излишней наладки технологического процесса и т. д.

– Вероятность неправильного принятия H_A гипотезы – ошибка второго рода β , риск II, риск потребителя или заказчика, риск незамеченной разладки технологического процесса и т. д.

Ошибки первого и второго рода уменьшаются при увеличении объема выборки и равны нулю при проверке ГС в целом. Ошибка первого рода принимается в пределах от 1 до 10 %, ошибка второго рода от 10% и больше.

Приведем алгоритм распознавания гипотез на примере N -распределения, в случае проверки гипотез для других распределений алгоритм не меняется, а в нем используются статистики рассматриваемого распределения (см. табл. П2.4).

1. Принимаем нулевую гипотезу $H_0: \mu = \mu_0$ ($\mu - \mu_0 = 0$).

2. Формируем альтернативную гипотезу $H_A: \mu \neq \mu_0$ ($\mu - \mu_0 \neq 0$).

3. Используем статистику N распределения $\hat{z} = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma} \sum n$ или статистику любого другого проверяемого закона распределения.

4. Принимаем уровень значимости α и по нему из таблиц для проверяемого закона распределения находим табличное значение статистики z для принятого уровня значимости, такое, что при верной H_0 соблюдалось условие $P(|\hat{z}| \geq z) = \alpha$.

5. Сравниваем статистическое и табличное значения статистик,

если $|\hat{z}| < z$, то H_0 не отвергается,

если $|\hat{z}| > z$, то H_0 отвергается на принятом уровне значимости α .

Пример.

Пусть взята первая выборка с параметрами

$\mu_0 = 25,0$; $\sigma_0 = 6,0$; $n = 36$; $\bar{x} = 23,2$; $\alpha = 0,05$

$H_0: \mu = \mu_0$

$H_A: \mu \neq \mu_0$

$$|\hat{z}| = \frac{|23,2 - 25,0|}{6} \sum 36 = 1,8,$$

$|\hat{z}| = 1,8 < 1,96 = z_{0,05}$, следовательно, H_0 подтверждается на принятом уровне значимости.

Пополним первую выборку до 49 членов, параметры выборки примут вид

$\mu_0 = 25,0$; $\sigma_0 = 6,0$; $n = 49$; $\bar{x} = 23,1$; $\alpha = 0,05$;

$$|\hat{z}| = \frac{|23,1 - 25,0|}{6} \sum 49 = 2,22;$$

$|\hat{z}| = 2,22 > 1,96 = z_{0,05}$, следовательно, H_0 отвергается на принятом уровне значимости.

В теории математической статистики рассматриваются разные виды критериев:

– критерии значимости (принять или отклонить),

– параметрические критерии, когда проверяется численное значение параметра $\mu = \mu_0$,

– критерии согласия, проверяющие согласуется ли экспериментальное распределение с гипотетическим распределением. Пример применения критерия согласия Пирсона приведен в Прил. ПЗ.

3. Односторонние и двусторонние критерии

Если цель эксперимента состоит в установлении различия между двумя ГС, то знак этого не известен. На рис. П2.2 представлена эта ситуация. Когда нулевая гипотеза сформирована в виде $H_0: \mu_1 = \mu_2$, то неизвестно, какой из параметров имеет большее значение; тогда альтернативная гипотеза $H_A: \mu_1 \neq \mu_2$, утверждает, что проверяемые значения относятся к разным совокупностям. Этот случай относится к понятию двустороннего критерия, так как H_A , записанная в виде $\mu_1 > \mu_2$ или $\mu_1 < \mu_2$ рассматривается как возможные исходы. Если задано строгое условие типа $H_0: \mu_1 > \mu_2 \rightarrow H_A: \mu_1 \leq \mu_2$ или $H_0: \mu_1 < \mu_2 \rightarrow H_A: \mu_1 \geq \mu_2$, то такой критерий называется односторонним. Статистический критерий H_S определит ошибки первого и второго рода, как это показано на рисунке для случая *a*). Если сохранить значение уровня значимости α неизменным, но сделать критерий двусторонним, то от хвостов распределения μ_1 отсекаются площади равные $\alpha/2$ (случай *б*). Видно, что при этом величина ошибки второго рода возрастает, как это представлено серой областью на рис. П2.2, *б*).

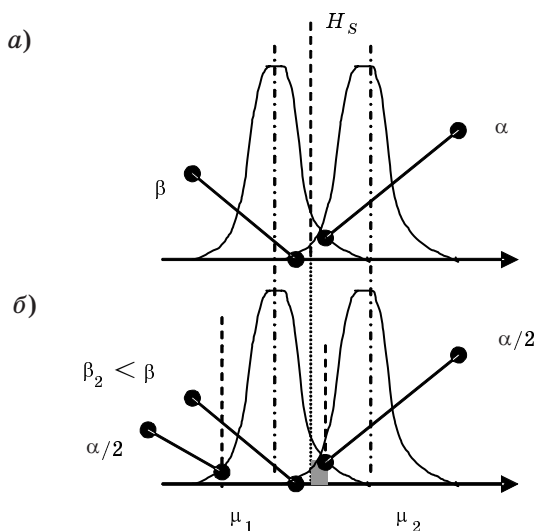


Рис. П2.2. Статистический критерий: *a* – односторонний; *б* – двусторонний

Значение ошибки второго рода зависит от объема выборки, от степени различия ГС (расстояния между центрами распределений и, наконец, от мощности критерия $M = 1 - \beta$. *Следует запомнить, что односторонний критерий при одинаковых объемах выборки всегда мощнее двустороннего критерия!*

Приведем главные правила оценки мощности критерия:

1. Критерий при заданной разнице между выборками тем мощнее, чем больше уровень значимости α и объем выборки n .

2. Если различие между средними значениями двух рассматриваемых выборочных распределений велико (хвосты распределений не пересекаются, то мощность критерия равна единице.

3. Если между распределениями практически нет различия, то отклонение верной гипотезы произойдет лишь в $\alpha\%$ случаев.

Примечание: Другие сведения по понятиям математической статистики следует искать в специальной литературе. В Прил. ПЗ, П4 дан сквозной пример оценки неизвестной функции распределения и неизвестных параметров.

П.3. Определение неизвестной функции распределения

Сущность экспериментальной оценки характеристик качества состоит в том, что на основании полученных из опыта ограниченных исходных статистических данных производится определение фактических законов или возможных значений параметров с заданной точностью и достоверностью. При наличии известных аналитических связей между различными показателями качества элементов и систем в процессе эксперимента определяют те исходные показатели, получить которые проще и дешевле.

Так, например, при экспериментальной оценке надежности радиолокационного вооружения, являющейся одним из свойств качества, исходными статистическими данными обычно являются частные или суммарные реализации времени безотказной работы, времени восстановления и число отказов, возникших (и устраненных) за суммарное время. По этим исходным данным определяются неизвестные законы и параметры безотказности, восстанавливаемости, а также обобщенные показатели надежности с заданной точностью и достоверностью. Методы решения подобных задач рассмотрим на примере оценки неизвестных законов и параметров безотказности.

Основной характеристикой случайной величины является распределение плотности вероятности. Зная его, можно рассчитать все другие необходимые показатели. Рассмотрим решение задачи экспериментального определения неизвестной плотности вероятности $F(t)$

случайной величины T – времени безотказной работы некоторой радиоэлектронной системы. Определение плотности вероятности $F(t)$ можно осуществить, если в качестве исходных данных будет известен достаточно большой объем статистики – n , частных конкретных реализаций $T = t, (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ случайной величины T .

Исходные значения величин $T - t_1$ определяются следующим образом. Фиксируется начало испытаний системы на надежность после ее включения в работу. Отмечается момент возникновения первого отказа t_1 . Первая величина $T = t_1$ будет равна интервалу времени с момента начала работы до момента возникновения первого отказа. Возникший отказ устраняется, и работа системы вновь восстанавливается. Новая случайная величина $T = t_2$ равна отрезку времени от момента второго включения до момента возникновения второго отказа и т. д. Таким образом, фиксируются все интервалы $T = t_1$ времени безотказной работы между двумя последовательными отказами. Для более достоверного определения $F(t)$ необходимо продолжать испытания до тех пор, пока получится достаточно большое число реализаций $n (n \geq 100)$. Полученный набор всех величин $T = t_1$ записывается в виде неупорядоченного статистического ряда $(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n)$ или заносится в соответствующую таблицу.

Сформулируем задачу:

Дано: Набор n исходных статистических данных $T = t, (i = 1, 2, \dots, n)$. Пусть $n = 100$.

Требуется определить аналитическую зависимость неизвестного закона $F(t)$ – плотности вероятности случайной величины T .

Решение. Определение неизвестного закона $F(t)$ целесообразно производить в следующей последовательности:

- А. Первичная обработка исходной статистики.
- Б. Графическое изображение статистических данных.
- В. Выравнивание статистических графиков.
- Г. Определение критерия согласия.

А. Первичная обработка исходной статистики

В соответствии с физическим определением плотности вероятности $F(t)$ ее опытное значение F^* в любой точке $T = t_1$ рассчитывается по формуле

$$F(t = t_1) \approx F^*(t_j) = F_j = \frac{\Delta n_j^*}{n \Delta t}, \quad \text{ПЗ.1}$$

где Δn_j^* – число отказов, приходящихся на j -й интервал длиной Δt на оси возможных значений случайной величины T (интервал Δt накрывает точку t_j). Обычно точка t_j выбирается в середине Δt .

На этапе первичной обработки исходной статистики, исходя из формулы (ПЗ.1), необходимо определить:

- минимальное (t_{\min}) и максимальное (t_{\max}) значения из статистического ряда полученных величин $T = t_i$;
- длину частных интервалов группирования Δt , на которые следует разбить весь полученный интервал $R = t_{\max} - t_{\min}$;
- значения величин Δn_j^* в каждом частном интервале Δt ;
- статистические значения элементов вероятности отказов для каждого интервала Δt :

$$\Delta Q_j^* = \frac{\Delta n_j^*}{n} \quad \text{ПЗ.2}$$

- опытные статистические значения F^* ;
- заполнить таблицу результатов первичной обработки статистики.

Значения t_{\min} , t_{\max} берутся непосредственно из полученного статистического ряда величин t_i . Длина всего интервала $R = t_{\max} - t_{\min}$ дает первое представление о том, что наиболее вероятное значение случайной величины T может быть заключено между t_{\min} , t_{\max} , т. е. неизвестная плотность вероятности $F(t)$ распределена примерно в этом отрезке значений случайной величины T .

Длина интервала Δt может быть ориентировочно выбрана с использованием эмпирической формулы

$$\Delta t \approx \frac{R}{1 + 3,3 \ln n} \approx \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k}, \quad \text{ПЗ.3}$$

где k – число частных интервалов Δt .

Значение числа k сначала ориентировочно оценивается по формуле $k \approx 1 + 3,3 \ln n$ и обычно выбирается в пределах $k = 10 \div 30$.

Подсчет количества реализаций Δn_j^* по интервалам группирования Δt практически осуществляется следующим образом. Заблаговременно заготавливается бланк, образец которого дан в табл. ПЗ.1. Таблица разбивается на k колонок, представляющих собой интервалы Δt . Пусть, например, $t_{\max} = 200$ ч, $t_{\min} = 1$ ч, тогда значения Δt и k целесообразно выбрать следующие:

$$\Delta t \approx (200 - 1) / (1 + 3,3 \lg 100) \approx 26 \text{ ч (принимаем } \Delta t = 20 \text{ ч);}$$

$$k \approx 1 + 3,3 \lg 100 \approx (t_{\max} - t_{\min}) / \Delta t \approx (200 - 1) / 20 \approx 10.$$

В каждой колонке приводится значение середины интервала

$$t_1 = t_j \quad (t_j = 10; 30; 50; 70; 90; 110; 130; 150; 170; 190)$$

либо крайние правые границы интервалов $t_j + \Delta t / 2 - (20; 40; 60; 80; 100; 120; 140; 160; 180; 200)$. После этого рассматривается первое

число из имеющегося неупорядоченного статистического ряда $T = t_i$ определяется, к какому интервалу следует отнести это число. Например, $t_1 = 75$ ч. В этом случае в четвертой колонке табл. ПЗ.1 с серединой $t_j = 70$ ч и правой границей 80 ч ставится «крестик», а число $t_i = 75$ ч вычеркивается из ряда. Затем рассматривается второе число ряда $T = t_2$ и заносится «крестик» в соответствующую колонку табл. ПЗ.1 и т. д. После того, как все $n = 100$ чисел $T = t_i$ рассортированы по колонкам таблицы, производится подсчет чисел Δn_j^* для каждого интервала Δt .

Пусть значения опытных чисел Δn_j^* получены такие, как в табл. ПЗ.1 ($\Delta n_1^* = 31$, $\Delta n_2^* = 22$, $\Delta n_3^* = 13$, $\Delta n_4^* = 13$, затем 7, 5, 4, 2, 2 и 1). Разумеется, должно выполняться условие:

$$\sum_{j=1}^k \Delta n_j = n = 100.$$

После того, как определены величины Δn_j^* , необходимо проверить нет ли слишком малых значений Δn_j^* (например, $\Delta n_j^* < 3 \div 4$). Поскольку малые значения дают недостаточную информацию об истинной закономерности распределения изучаемой случайной величины на этом интервале, то рекомендуется соседние интервалы с малым значением Δn_j^* укрупнить в один, длина которого будет больше чем Δt .

В нашем примере целесообразно последние три интервала объединить в один, длиной $\Delta t' = 3\Delta t = 60$ ч с новым числом $\Delta n_8^* = 5$. Окончательно имеем всего $k = 8$ интервалов, семь первых длиной по 20 ч и один последний длиной 60 ч.

Теперь рассчитываются опытные значения элементов вероятности ΔQ_j^* и F_j^* для всех интервалов, и результаты первичной обработки статистики заносятся в табл. ПЗ.1.

Б. Графическое изображение статистических данных

По результатам первичной обработки исходной статистики (табл. ПЗ.1) строится *гистограмма*, являющаяся наглядным представлением полученных исходных статистических данных. Гистограмма представляет собой графическую зависимость статистических значений F_j^* в точках $T = t_j$. Значение функции F_j^* , принимается постоянным для всего интервала Δt , поэтому графически гистограмма имеет вид отдельных прямоугольников с основанием шириной Δt и высотой, равной F_j^* .

Гистограмма обладает рядом важных свойств:

— напоминает неизвестную искомую функцию $F(t)$ т. е. $F_j^* \approx F(t)$,

Экспериментальные данные примера

↑ Количество статистических реализаций случайной величины t по интервалам Δt	$\Delta\Pi_1^*$	$\Delta\Pi_2^*$	$\Delta\Pi_3^*$	$\Delta\Pi_j^*$	$\Delta\Pi^*$		
	31	22	13	13	7	5	4	2	2	1		
	X											
	XX											
	XX											
	XX	XX										
	XX	XX										
	XX	XX										
	XX	XX										
	XX	XX	X	X								
	XX	XX	XX	XX								
	XX	XX	XX	XX								
	XX	XX	XX	XX	X							
	XX	XX	XX	XX	XX	X						
	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	X	
	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	X	
Значение середины интервалов Δt	t_j	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210 230
Величина интервала	Δt	20	20	20	20	20	20	20	$\Delta t' = 60$			
Статистическое значение вероятности отказов	ΔQ_j^*	ΔQ_1^*	ΔQ_2^*	ΔQ_3^*	ΔQ_j^*	ΔQ_j^*	$\sum_{j=1}^n \Delta Q_j^* = 1$
Опытные значения плотности вероятности	F_j^*	F_1^*	F_2^*	F_3^*	F_i^*	F_n^*	$\sum_{j=n}^n F_j^* \Delta t = 1$

— площадь, ограниченная гистограммой, равна единице, т. е.

$$\sum F_j^* \Delta t \approx 1, \tag{ПЗ.4}$$

– используя гистограмму, можно определить среднестатистическое значение T_0^* , которое примерно равно неизвестному значению средней наработки на отказ T_0 (т. е. математическому ожиданию случайной величины T), по формуле

$$M|T| = T_0 \approx T_0^* \approx \sum_{j=1}^k t_j F_j^* \Delta t. \tag{ПЗ.5}$$

Гистограмма для рассмотренного примера изображена на рис. ПЗ.1.

Поскольку опытное значение вероятности отказа системы ΔQ_i^* на интервале Δt равно $\Delta Q_j^* = F_j^* \times \Delta t$, то площадь любого прямоугольника гистограммы численно равна соответствующей величине ΔQ_i^* .

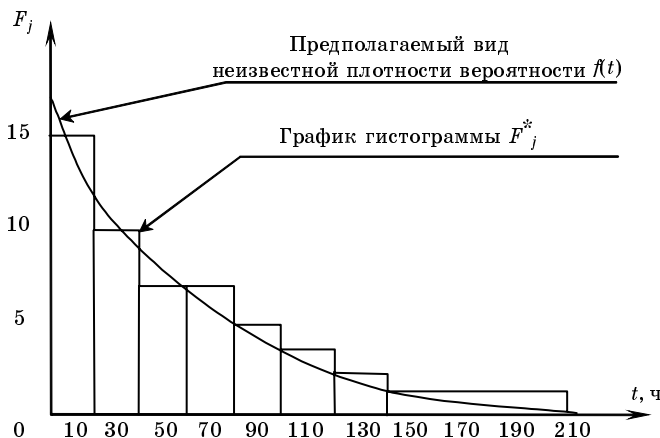


Рис. ПЗ.1 Гистограмма данных примера

Величины ΔQ_i^* являются приближенной статистической оценкой неизвестных вероятностей отказов ΔQ_i^* соответствующих элементов. Таким образом, построив гистограмму F_j^* , получим первое наглядное представление о форме неизвестной функции $F(t)$, т. е. гистограмма помогает сделать вывод об аналитической зависимости неизвестного закона $F(t)$. Но пока еще неизвестен вид этого закона, т. е. его аналитическая форма.

В. Выравнивание статистических графиков

Неизвестная плотность вероятности $F(t)$ является плавной и непрерывной кривой — функцией аргумента t . Гистограмма же F_j^* хотя и напоминает по форме функцию $F(t)$, имеет вид ступенчатой ломаной кривой (рис. ПЗ.1). Если повторить аналогичный опыт по набору новой серии подобных случайных величин $T = t_i$ в тех же условиях эксперимента и для такой же системы, то построенная вновь гистограмма не совпадет с ранее полученной, хотя она по-прежнему будет напоминать неизвестную плотность $F(t)$.

Для того чтобы статистически согласовать гистограмму с плавной кривой $F(t)$, производят *статистическое выравнивание* полученной ступенчатой кривой. Используя полученную гистограмму,

производят соответствующий выбор некоторой функции $\varphi(t)$, которая выравнивала бы гистограмму и с большой вероятностью приближалась бы по форме к неизвестной функции $F(t)$. Другими словами, при выборе функции $\varphi(t)$ требуется, чтобы она по вероятности совпала с $F(t)$, т. е. $\varphi(t) \approx F(t)$.

Статистическое выравнивание гистограммы производится в следующей последовательности:

- выбор одной из сглаживающих функций $\varphi(t) \approx F(t)$,
- расчет неизвестных параметров для выбранной сглаживающей функции;
- расчет теоретических значений сглаживающей функции в фиксированных точках $t = t_j$,
- построение графика сглаживающей функции;
- качественный вывод о справедливости допущения $\varphi(t) \approx F(t)$.

При выборе сглаживающей функции $\varphi(t) \approx F(t)$ стараются учесть особенности гистограммы и аналитическое выражение $\varphi(t)$, которое должно быть несложным и удобным в инженерных расчетах. Полезно учитывать особенности и опыт работы системы, для которой оценивается закон $F(t)$.

Анализируя гистограмму, изображенную на рис. ПЗ.1, можно выбрать простую функцию $\varphi(t)$ в виде убывающей экспоненты, т. е. допустить, что

$$F(t) \approx \varphi(t) = C_1 e^{-C_2 t}. \quad \text{ПЗ.6}$$

При различных значениях параметров C_1 и C_2 имеется бесчисленное множество убывающих экспонент, среди которых надо выбрать только одну, обладающую свойствами плотности вероятности и особенностями полученной гистограммы. Следовательно, на выбираемую сглаживающую функцию (ПЗ.6) необходимо наложить определенные связи (требования). Число этих связей зависит от вида функции и количества, входящих в нее неизвестных параметров.

Первая связь, которую необходимо наложить на функцию $\varphi(t)$ за счет соответствующего подбора констант C_1 и C_2 , называется нормирующим условием. Поскольку $\varphi(t)$ должна быть плотностью вероятности и обладать нормирующим свойством, то необходимо выполнить первое условие: площадь под кривой в (t) должна быть равна единице, т. е.

$$\int_0^{\infty} \varphi(t) dt = \sum_{j=1}^k F_j^* \Delta t_j = 1. \quad \text{ПЗ.7}$$

Отсюда имеем

$$1 = \int_0^{\infty} C_1 e^{-C_2 t} dt = C_1 \frac{1}{C_2},$$

следовательно,

$$C_1 = C_2 = C.$$

Значит, при выборе выравнивающей функции в виде убывающей экспоненты необходимо потребовать в первую очередь, чтобы эта экспонента зависела только от одного неизвестного параметра, т. е.

$$F(t) \approx \varphi(t) = Ce^{Ct} \quad \text{ПЗ.8}$$

Пока не наложено определенное условие на константу C , можно выбрать любое значение этой константы и при этом всегда будет выполнено нормирующее условие. Однако при произвольном значении константы $\varphi(t)$ будет плохо согласовываться с гистограммой.

Поскольку статистическая величина

$$T_0^* \approx \sum_{j=1}^k t_j F_j^* \Delta t_j$$

оценивает математическое ожидание T_0 случайной величины T (т. е. $T_0 = M\{T\}$), то на выравнивающую функцию необходимо наложить вторую связь, а именно

$$T_0 = M\{T\} = \int_0^{\infty} t F(t) dt \approx T_0^* \approx \sum_{j=1}^k t_j F_j \Delta t_j. \quad \text{ПЗ.9}$$

Реализуя это условие, получим

$$T_0^* = \int_0^{\infty} t C e^{-Ct} dt = C \frac{1}{C^2} = \frac{1}{C}. \quad \text{ПЗ.10}$$

Значит, величину параметра C нельзя брать произвольной, а необходимо ее рассчитывать из соотношения

$$C = \frac{1}{T_0^*}.$$

Рассчитав по опытным данным величину T_0^* (для нашего примера $T_0 = 50$ ч), окончательно полагаем, что только функция $\varphi(t)$ вида

$$\varphi(t) = \frac{1}{T_0} e^{-\frac{t}{T_0}} = 0,02^{0,02t} = F(t) \quad \text{ПЗ.11}$$

будет согласовываться с данными эксперимента и обладать свойствами неизвестной плотности вероятности $F(t)$.

Таким образом, наложив две связи на выравнивающую функцию (запомним число связей $s = 2$), полагаем, что неизвестная искомая плотность вероятности $F(t)$ имеет вид

$$F(t) - \frac{1}{T_0^*} e^{-\frac{t}{T_0^*}} = 0,02e^{-0,02t} = 10^{-3} \cdot 20 \cdot e^{-0,02t}. \quad \text{ПЗ.12}$$

Задаваясь теперь любыми фиксированными значениями $T = t_j$, легко рассчитать теоретические значения $F(t = t_j)$ и сравнивать их с опытными данными F_j^* . График найденной функции $F(t)$ обычно наносят на гистограмму и производят качественную оценку степени соответствия теоретического закона $F(t)$ с опытными данными – гистограммой.

Анализируя графики гистограммы F_j^* и расчетную кривую функции $F(t) = 0,02e^{-0,02t}$ (рис. ПЗ.1), можно сделать качественный вывод, что выбранная $F(t)$ неплохо согласуется с данными эксперимента.

Для того чтобы иметь не качественную, а количественную оценку степени соответствия выбранной $F(t)$ статистическим данным, необходимо произвести численную проверку согласия.

Г. Определение критерия согласия

Критерии согласия позволяют количественно обосновать приемлемость приближенного равенства

$$\varphi(t) = F(t) \approx F_j^*. \quad \text{ПЗ.13}$$

Существует несколько критериев проверки согласия, но общую сущность их применения можно пояснить следующим образом:

а) выбирается мера расхождения Δ между теоретической кривой $F(t)$ и гистограммой F_j^* . Эта мера расхождения может усредняться (или суммироваться) для всех выбранных значений интервалов Δt или возможных значений изучаемой случайной величины T .

Если мера расхождения Δ рассчитывается как модуль разности, например $\Delta = |F_j^* - F(t)|$, то чем меньше получится значение Δ , тем лучше согласие между $F(t)$ и F_j^* ,

б) назначается граничное допустимое значение меры расхождения $\Delta = \Delta_{\text{гр}}$;

в) если опытное (расчетное) значение меры расхождения $\Delta = \Delta_{\text{оп}} < \Delta_{\text{гр}}$, то полагают, что выбранная функция $F(t)$ хорошо согласуется с опытными данными. Если $\Delta_{\text{оп}} > \Delta_{\text{гр}}$, то выбранное равенство (ПЗ.13) $F(t) = F_j^*$ отменяют или подвергают его большому сомнению.

Поскольку величина Δ зависит от случайных опытных значений F_j^* , то она сама является случайной величиной и имеет свой вероятностный закон распределения. Этот закон определяется в соответствии с выбранным критерием согласия.

Допустим, что нам известна плотность вероятности $\psi(\Delta)$ случайной величины Δ [меры расхождения между F_j^* и $F(t)$]. Пусть она имеет вид, показанный на рис. ПЗ.2. При выборе допустимой меры расхождения $\Delta_{гр}$ исходят из условия обеспечения достаточно большого значения вероятности неравенства $\Delta \geq \Delta_{гр}$, т. е. требуют, чтобы

$$\gamma = P(\Delta \geq \Delta_{гр}) = \int_{\Delta=\Delta_{гр}}^{\infty} \psi(\Delta)d\Delta > 0,3 \div 0,4. \quad \text{ПЗ.14}$$

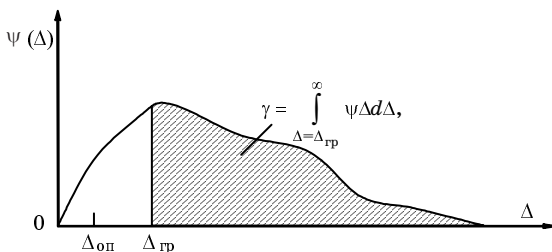


Рис. ПЗ.2. Зависимость распределения меры расхождения

Большое значение вероятности γ эквивалентно тому, что опытное значение меры расхождения $\Delta = \Delta_{оп}$ окажется меньше $\Delta_{гр}$. Если, например, величина $\Delta_{оп}$, рассчитанная по опытным данным, получилась близкой к нулю, то тогда заштрихованная площадь на рис. ПЗ.2, численно равная вероятности

$$\gamma = \int_{\Delta_{оп}}^{\infty} \psi(\Delta)d\Delta,$$

будет достаточно большой (близкой к единице). Значит, в этом случае с уверенностью, равной вероятности γ , можно утверждать обоснованность хорошего согласия между выбранной функцией $F(t)$ и опытными данными.

Рассмотрим широко применяемый на практике критерий согласия хи-квадрат Пирсона.

Здесь в качестве меры расхождения Δ выбрана величина, определяемая из выражения

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{оп}} = \chi_0^2 &= \sum_{j=1}^k \frac{(\Delta n_j - \Delta n_j^*)^2}{\Delta n_j} = n \sum_{j=1}^k \frac{(\Delta Q_j - \Delta Q_j^*)}{\Delta Q_j} = \\ &= n \sum_{j=1}^k \frac{(F_j - F_j^*)^2 \Delta t}{F_j} = \sum_{j=1}^k \chi_j^2.\end{aligned}\quad \text{ПЗ.15}$$

При расчете опытного значения полученной меры расхождения $\chi^2 = \chi_0^2$, входящие в формулу ПЗ.15 величины Δn_j ; ΔQ_j ; F_j рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta Q_j &= \int_{t_j - \frac{\Delta t_j}{2}}^{t_j + \frac{\Delta t_j}{2}} F(t) dt \approx F(t - t_j) \Delta t = F_j \Delta t_j; \\ \Delta n_j &= n \Delta Q_j = n F_j \Delta t_j.\end{aligned}\quad \text{ПЗ.16}$$

Для нашего примера имеем:

$$\Delta Q_1 = 0,02 e^{-0,02 \cdot 10} \cdot 20 = 0,328,$$

а опытное значение

$$\Delta Q_1^* = \frac{\Delta n_1^*}{n} = \frac{31}{100} = 0,31;$$

$$\Delta Q_2 = 0,02 e^{0,02} = 0,22;$$

$$\Delta n_1 = 100 \cdot 0,02 e^{0,02 \cdot 10} \cdot 20 = 32,8$$

$$\Delta n_2 = 100 \cdot 0,22 = 22 \text{ (а } \Delta n_2^* = 22 \text{) и т. д.}$$

Значит, первое слагаемое суммы (ПЗ.15) будет равно

$$\frac{(\Delta n_1 - \Delta n_1^*)^2}{\Delta n_1} = \frac{(32,8 - 31)^2}{32,8} \approx 0,1.$$

А второе –

$$\frac{(\Delta n_2 - \Delta n_2^*)^2}{\Delta n_2} = \frac{(22 - 22)^2}{22} = 0.$$

Плотность распределения $\psi(\chi^2)$ случайной величины χ^2 зависит от параметра r , называемого числом степеней свободы распределения $\psi(\chi^2)$. Число степеней свободы рассчитывается как раз-

ность $r = k - s$, где k – число интервалов (в нашем примере $k = 8$); s – число наложенных связей на функцию $\varphi(t)$ (у нас $s = 2$).

Для некоторых значений чисел r рассчитаны таблицы значений вероятности неравенства $\chi^2 \geq \chi_0^2$ на основе выражения

$$\gamma = P_{\chi^2} = P(\chi^2 \geq \chi_0^2) = \int_{\chi^2 = \chi_0^2}^{\infty} \psi(\chi^2) d\chi^2. \quad \text{ПЗ.17}$$

Зависимость вероятности P_{χ^2} от чисел r и χ^2 берется из стандартных таблиц. Использование таблицы для применения критерия согласия хи-квадрат Пирсона сводится к следующему: по опытным и расчетным значениям Δn_j^* ; Δn_j ; или $(\Delta Q_j^*); (\Delta Q_j)$; или F_j^* ; F_j) рассчитывается опытное значение χ_0^2 по формуле (ПЗ.15).

Величина χ^2 по результатам расчета получилась равной $\chi^2 = 1,86$; затем определяют число степеней свободы r ($r = k - s = 8 - 2 = 6$).

По входным данным $\chi^2 = 1,86$ и $r = 6$ из таблиц определяют, что вероятность $P_{\chi^2} > 0,95$.

Следовательно, полученная опытная мера расхождения $\chi^2 = 1,86$ является малой (допустимой), при этом с уверенностью, численно равной вероятности $\gamma = P_{\chi^2} = 95\%$, можно утверждать обоснованность и хорошее согласие приближенного вероятностного равенства (ПЗ.12)

$$F(t) \approx F_j.$$

Таким образом, для нашего примера при расчетах можем полагать, что неизвестная плотность вероятности $F(t)$ для исследуемой системы имеет вид

$$F(t) = \frac{1}{50} e^{-\frac{t}{50}} = 0,02 e^{-0,02t}.$$

Приемлемое значение вероятности P_{χ^2} должно лежать в пределах $P_{\chi^2} \geq 30 \div 40\%$. Если же полученная из таблицы вероятность P_{χ^2} окажется меньше $5-10\%$, то имеются все основания полагать, что выбранная плотность вероятности $F(t)$ плохо согласуется с экспериментальными статистическими данными. В этом случае необходимо выбрать другую функцию $F(t)$ и снова проверить ее по критерию согласия хи-квадрат Пирсона.

П.4. Определение неизвестной случайной величины

В процессе эксплуатации радиолокационного вооружения или специальных испытаний на надежность возникает необходимость экспериментально оценить неизвестные параметры, как например, сред-

нее время безотказной работы T_0 ; среднее время восстановления T_B ; интенсивность отказов λ и т. п.

Методика и последовательность решения задачи статистической оценки различных неизвестных параметров имеет определенную общность. Рассмотрим решение задачи экспериментальной оценки неизвестного параметра безотказности T_0 некоторой радиолокационной системы, испытываемой в процессе эксплуатации.

Поскольку величина T_0 является математическим ожиданием случайной величины T – времени безотказной работы между отказами, т. е.

$$T_0 = M(T),$$

то, естественно, для оценки параметра T_0 необходимо в качестве исходных статистических данных располагать фактическими частными реализациями случайной величины T , т. е. иметь набор опытных данных:

$$T = t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n.$$

В каждой из случайных величин $T = t_i$ содержится определенная информация о законе распределения случайной величины T и о ее математическом ожидании T_0 . В отличие от оценки неизвестного закона $F(t)$, когда требовался большой объем статистических данных ($n > 100$), число n реализаций $T = t_i$ при оценке T_0 может быть любым, в том числе и малым. Однако при малой статистике точность и достоверность оценки могут оказаться недостаточными, поэтому обычно требуют, чтобы число реализаций n при оценке параметра T_0 было бы больше десяти, хотя и при меньших n можно указать соответствующие точность и достоверность оценки.

В процессе статистической оценки определяется не сама неизвестная величина T_0 , а ее опытное значение или точечная оценка T_0^* , причем $T_0^* \approx T_0$.

Это приближенное вероятностное равенство тем точнее и достовернее, чем больший объем исходной статистики используется для расчета экспериментальной величины T_0^* . Так как для расчета опытной величины T_0^* используются частные реализации случайной величины $T = t_i$, то и сама T_0^* является случайной величиной. Этим объясняется характер приближенного равенства $T_0^* \approx T_0$.

Задачу оценки неизвестного параметра T_0 сформулируем следующим образом.

Дан некоторый набор n исходных статистических данных $T = t_i$, при $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Требуется оценить неизвестный параметр безотказности T_0

Решение. Для правильной и полной статистической оценки неизвестного параметра T_0 по результатам эксперимента необходимо:

- во-первых, определить, по какой формуле рассчитывать наилучшую статистическую оценку для неизвестного параметра T_0 , используя исходную статистику;
- во-вторых, какова достоверность и точность получаемой оценки.

А. Наилучшая статистическая оценка

Используя исходные статистические данные $T = t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$, можно предложить несколько формул для расчета опытного случайного значения T_0^* , например:

$$T_{01}^* = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2}}{n-1};$$

$$T_{02}^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n};$$

$$T_{03}^* = \frac{\sqrt[3]{\sum_{i=1}^n t_i^3}}{n-2}; \text{ и т. д.}$$

т. е.

$$T_0^* = \varphi(t_i; n). \quad \text{П4.1}$$

Но какая же из всех возможных формул дает наилучшую оценку для T_0 ?

В методах математической статистики под наилучшей статистической оценкой T_0^* для неизвестного параметра T_0 выбирается такая формула-оценка $T_0 = \varphi(t_i, n)$, которая удовлетворяет трем основным требованиям: *состоятельности; несмещенности; эффективности.*

Так как статистическая оценка $T_0 = \varphi(t_i, n)$ является случайной величиной, то она имеет свой закон распределения, математическое ожидание и дисперсию.

Свойство *состоятельности* оценки T_0^* заключается в том, что при $n \rightarrow \infty$ ее математическое ожидание $M(T_0^*)$ сходится к математическому ожиданию $T_0 = M(T)$ изучаемой случайной величины T :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} M\{T_0^*\} \rightarrow M\{T\} = T_0.$$

Если $M(T_0^*) = T_0$ при любых значениях n (в том числе и при малых), то такая оценка обладает свойством *несмещенности*.

Та оценка, которая имеет наименьшую дисперсию, является *эффективной* оценкой.

Формула для расчета наилучшей статистической оценки $T_0 = \varphi(t_i, n)$ зависит от вида плотности вероятности $F(t)$ случайных величин $T = t_i$, входящих в эту формулу.

Используя известный в математической статистике метод максимума правдоподобия, можно показать, что если плотность вероятности $F(t)$ исходных случайных величин $T = t_i$ имеет экспоненциальное распределение, т. е.

$$F(t) = \frac{1}{T_0} e^{-\frac{t}{T_0}} = \lambda e^{-\lambda t}, \quad \text{П4.2}$$

то наилучшая статистическая оценка T_0^* для неизвестного параметра T_0 должна рассчитываться по формуле

$$T_0^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{t_{\Sigma}}{n} \approx T_0. \quad \text{П4.3}$$

Например, если имеется $t_1 = 72$ ч, $t_2 = 56$ ч, $t_3 = 103$ ч, то наилучшая оценка T_0^* равна:

$$T_0^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}; \quad T_0^* = 77 \text{ ч.}$$

Значит ли это, что неизвестный параметр T_0 тоже равен 77 часам? Конечно, нет! $T_0 \approx T_0^* = 77$ ч только по вероятности. Если повторить эксперимент по оценке T_0 в тех же условиях и снова набрать три значения t_1, t_2, t_3 , то в общем случае получим новое число

$$T_{01}^* = \frac{t'_{\Sigma}}{3} \neq 77.$$

Но по-прежнему будет справедливо вероятностное приближение $T_0 \approx T_0^*$. Значит, случайное число T_0^* в каждом повторении опыта при $n = \text{const}$ будет принимать случайные значения T_{0i}^* , приблизительно равные значению неизвестного числа T_0 .

Следовательно, если по результатам эксперимента получена какая-то оценка T_0^* , рассчитанная по формуле (П4.3), то можно лишь с некоторой вероятностной уверенностью утверждать, что область наиболее возможных значений для T_0 находится где-то в районе случай-

ного числа T_0^* (см. рис. П4.1). Есть лишь некоторая достоверность того, что неизвестное число T_0 лежит где-то между левой минимальной границей $T_1 = T_{\min}$ и правой максимальной $T_2 = T_{\max}$.

Следовательно, для того чтобы статистически полно определить приближенное вероятностное равенство $T_0^* \approx T_0$, необходимо указать достоверность и точность оценки.

Достоверность определяет степень уверенности в том, что данное статистическое утверждение истинно.

Количественно достоверность измеряется вероятностью того, что возможные значения неизвестного параметра заключены в определенном интервале. Этот интервал называется *доверительным интервалом*, а его границы – *доверительными границами*.

Наиболее вероятностная область возможных значений T_0^* для неизвестного параметра T_0

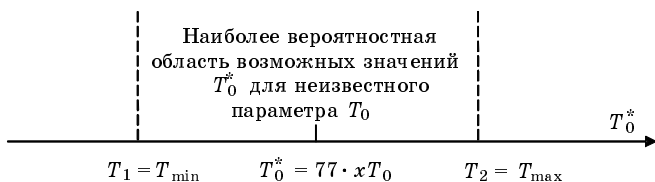


Рис. П4.1. Иллюстрация нахождения случайных значений

Достоверность численно равна вероятности того, что оцениваемый параметр заключен в доверительном интервале.

Точность оценки определяется численными значениями границ доверительного интервала (т. е. его левого, минимального, и правого, максимального, значения).

Если достоверность велика, то велика и практическая уверенность в том, что неизвестный параметр, действительно, заключен между указанными доверительными границами. Поэтому доверительная вероятность физически обозначает меру практической уверенности в истинности статистической оценки.

Применительно к изучаемому вопросу оценки неизвестного параметра T_0 доверительная вероятность γ равна:

$$\gamma = P(T_1 \leq T_0^* \approx T_0 \leq T_2). \quad \text{П4.4}$$

Величина доверительного интервала ($T_1 \div T_2$) (см. рис. П4.1) характеризует точность статистической оценки неизвестного параметра безотказности T_0 . Таким образом, характеризуя точность оценки T_0 , можно указать, что возможные значения для T_0 заключены в пределах между T_1 и T_2 , т. е.

$$T_{\min} = T_1 \leq T_0 \approx T_0^* \leq T_2 = T_{\max}.$$

Другими словами, можно сказать, что *достоверность* – это практическая гарантия того, что T_0 находится в заданных пределах точности оценки.

Следовательно, если зафиксировать границы точности оценки, то с ростом n увеличивается достоверность оценки. В практических расчетах доверительная вероятность γ принимается в интервале 90–99 %. Доверительные границы выбираются таким образом, чтобы вероятность $1 - \gamma$ делилась поровну слева от минимального значения и справа от максимального значения. Так, при принятой доверительной вероятности $\gamma = 90\%$, нижняя граница определится вероятностью от 5% до нуля, а верхняя граница от 95% до 100%. Левые и правые значения численно равны площадям под кривой распределения и позволяют определить коэффициенты точности оценки

$$\delta_1(n, \gamma_1) = \frac{T_1}{T_0} \text{ и } \delta_2(n, \gamma_2) = \frac{T_2}{T_0}.$$

Отсюда подставляя вместо неизвестного параметра его наилучшую оценку, получим:

$$T_1 \approx \delta_1 T_0^*,$$

представляющую нижнюю границу и $T_2 \approx \delta_2 T_0^*$, представляющую верхнюю границу. Значения коэффициентов точности табулированы и выбираются при задании объема выборки и заданной доверительной вероятности (беря значения верхней границы – $S(1-\gamma)$ и нижней границы $1 - S(1-\gamma)$).

Рассмотрим пример для трех значений времени $t_1 = 72$; $t_2 = 56$; $t_3 = 103$, $n = 3$; $\gamma = 90\%$

$$1. T_0^* = \frac{1}{3}(72 + 56 + 103) = 77 \approx T_0,$$

2. Из таблицы определяем значение коэффициента для нижней границы $\delta_1(3; 0, 95) = 0,272$ и для верхней границы $\delta_2(3; 0, 05) = 2,07$.

3. С доверительной вероятностью 90% утверждаем, что неизвестный параметр T_0 заключен в пределах:

$$T_1 = 0,272 \times 77 = 21 \leq T_0 \leq 2,07 \times 77 = 159.$$

Следует напомнить, что увеличение доверительной вероятности приведет к расширению интервала!

П.5. Пример построения модельного файла для примера 6.1 разд. 6.

Пример 6.1 Выбор лучшего варианта из 4 возможных (модель фабрики [7])

Д/Д процедура, описанная в подразд. 6.2, 6.3, проиллюстрирована с помощью описания имитационной модели ткацкой фабрики. Имитационная модель составлена на ЯИМ GPSS/H v.3 2000. [5, 7]

1. Постановка задачи

На ткацкой фабрике работает 10 ткацких станков, 5 дней в неделю, по 8 часов в день. На каждом станке работает отдельный рабочий. Поскольку существует возможность случайного отказа станка, то для обеспечения 400 часов оперативной работы в неделю возникают разные возможности:

- иметь один дополнительный станок в рабочем состоянии для немедленной замены отказавшего станка,
- восстановить имеющийся дополнительный станок (если он находится не в рабочем состоянии) как можно быстрее,
- поместить отказавший станок в ремонтную зону и начать его восстановление.

Эпюра возможных состояний представлена на рис. П5.1.

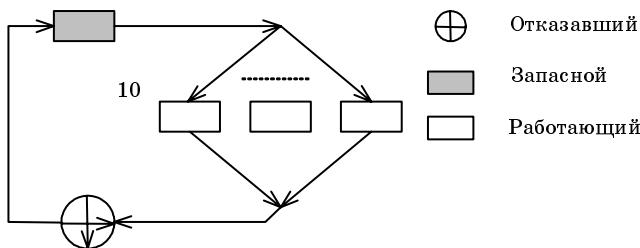


Рис. П5.1. Эпюра возможных состояний очереди на восстановление нет, запасной станок в рабочем состоянии

Итак, на эпюре изображено 12 станков, из них 10 работает, 1 – восстанавливается, но очереди на восстановление нет (хотя она и возможна), 1 – в полностью исправном состоянии находится в резервном режиме. Целью менеджмента фабрики является обеспечение 400 часов продуктивной работы в неделю. Час простоя станка стоит 560 рублей. Среднее число работающих машин равно 8, т. е. 64 часа в день, вместо ожидаемых 80, тогда сумма возможных потерь может достигнуть $16 \cdot 560 = 8960$ рублей. На фабрике есть один мастер по ремонту станков, но руководство готово нанять второго, если это окажется

эффективным. Оплата рабочего за день составляет 3600 рублей в день (пример гипотетический, поэтому не надо удивляться уровню оплаты труда, тем более, что она составляет лишь 35% стоимости простоя). При этом руководство не хочет нанимать дополнительных операторов для работы на станках и приобретать в собственность дополнительные станки кроме имеющихся 11, в связи с их дороговизной, но готово арендовать станок на долгосрочной основе. Стоимость аренды составляет 3000 рублей независимо от того используется станок или нет. Время восстановления отказавшего станка составляет 24 ± 8 часов и не может быть сокращено вдвое даже при наличии двух ремонтников. Время безотказной работы станка равняется 200 ± 100 часов, время замены отказавшего станка на исправный, пренебрежимо мало и не учитывается. Время восстановления и наработка на отказ принимается одинаковой для всех станков, также считается, что не существует разницы в квалификации рабочих и ремонтников. Возможны четыре стратегии поведения руководства:

- не делать ничего нового, альтернатива (0,1),
- нанять второго ремонтника, но не брать в аренду станок, альтернатива (0,2),
- не нанимать второго ремонтника, а арендовать 1 станок, (1,1),
- нанять второго ремонтника и арендовать 1 станок, (1, 2).

Нужно составить модель для описания процесса функционирования фабрики и используя Д/Д процедуру определить лучшую стратегию поведения руководства из 4 названных альтернатив в смысле минимизации ожидаемой дневной стоимости. Положим уровень доверительной вероятности равным 95 %, а уровень безразличия равным 300 рублей в сутки. На первом этапе провести 15 реплик для всех альтернатив. В определении дневной стоимости включать зарплату одного или двух ремонтников (3600 рублей в день), арендную плату (3000 рублей в день), стоимость простоя равна 540 рублей в час или 4480 рублей за рабочий день.

Будем считать, что в начале моделирования все 10 станков находятся в работоспособном состоянии. Оставшаяся работоспособность каждого станка определяется значением 150 ± 140 часов, т. е. лежит в интервале от 10 часов до 290. Другие собственные станки, в том числе и арендованный, обладают полным ресурсом.

2. Допущения, сделанные в модели

Оговорим ограничения, принимаемые в модели, поскольку они могут повлиять на функционирование отдельных операторов ЯИМ. Эти ограничения касаются числа ремонтников, числа рабочих-операторов, полного числа станков в системе. Первые два ограничения удобно представить ОУ

STORAGE, а третье – транзактами. Это объясняется тем, что число ремонтников и рабочих задается, а число станков может быть переменным и двигаться в процессе функционирования от этапа эпюры к этапу.

Рассмотрим особенности функционирования модели. Предположим, что станок готов к использованию, но в действие находится 10 исправных станков и память OPERATORS (напомним, что имя не может иметь больше 8 символов) полна и имеющийся станок, не может исполнить следующий ожидаемый оператор блока – ОБ ENTER OPERATORS. При этом выполняется условие, как только один из станков откажет, оператор освободится и сможет начать работу на резервном станке, который начнет функционирование со временем полностью исправного станка, т. е. начинает расходовать ресурс сначала в интервале (100,300), а не в интервале (10,290). Отказавший станок, пройдя все свои ОБ, возвращается к точке ожидания входа в систему. Очевидно, что эту логику можно представить двумя фрагментами модуля исполнения, со своим ОБ GENERATE,, 1, 1 который вводит 1 станок в момент 1 (момент отказа очередного станка). Еще один фрагмент модуля исполнения вводит при необходимости арендованный станок с помощью ОБ GENERATE,, 1, &LEASED.

3. Таблица определений

В модельном файле (МФ) введены следующие определения, введенные в табл. П5.1

Таблица П5.1

Определения примера 6.1

Объекты GPSS/H	Объекты системы
<i>Транзакты</i>	
1-й фрагмент	Арендванный станок
2-й фрагмент	Основные станки (в начале 10)
3-й фрагмент	Резервный станок
4-й фрагмент	Транзакт управления
<i>Амперпеременные</i>	
FIXERS	Число ремонтников (1, 2)
I	Счетчик реплик
LEASED	Число арендуемых станков (0, 1)
<i>Памяти</i>	
FIXSHOP	Память для ремонтников (1, 2)
OPERATORS	Память числа операторов

4. Модельный файл

```

*          Модуль 1 Управления и описания
SIMULATE                                     Пример 6.1 Модель ткацкой фабрики
*
INTEGER &FIXERS                             Временная дискрета : 1 час
INTEGER &I                                  число ремонтников
INTEGER &LEASED                             &I – индекс петли управления
OPERCOL 30                                  число арендованных машин
*КОЛОНКИ                                     считывание первого операнда с 30-й
UNLIST CSECHO                               запрет на показ ОУ
OPRATORS STORAGE 10                         10 операторов
*          Модуль 2 Исполнения
*          Фрагмент 1 Арендованный станок (при необходимости)
GENERATE ,,1,&LEASED                         ввод 1-го арендуемого станка в
*момент 1
TRANSFER ,REPEAT                             передача в основную линию
*          Фрагмент 2 Станки в основной линии
GENERATE 0,,,10                             функционирование 10 основных
*станков
ENTER OPRATORS                               занятие оператора (без задержки)
ADVANCE 150,140                              использование остаточного ресурса
TRANSFER ,BROKEN                             переход на восстановление
*          Фрагмент 3. Восстановление станка
GENERATE ,,1,1                               ввод восстановленного станка в
*момент 1
REPEAT ENTER OPRATORS                       занятие оператора
ADVANCE 200,100                              использование полного ресурса
BROKEN LEAVE OPRATORS                       при отказе освобождение оператора
ENTER FIXSHOP                                занятие ремонтника
ADVANCE 24,8                                 время восстановления
LEAVE FIXSHOP                                освобождение ремонтника
TRANSFER ,REPEAT                             передача на использование
*          Фрагмент 4 Временной таймер
GENERATE 1000                                25 рабочих недель
TERMINATE 1                                  сигнал на окончание процесса ИМ
*          Модуль 3 управления
DO &FIXERS = 1,2,1                           вначале 1, затем 2 ремонтника
FIXSHOP STORAGE &FIXERS                     изменение емкости памяти FIXSHOP
DO &LEASED = 0,1,1                           вначале 0, затем 1 арендованный
*станок
DO &I = 1,15,1                               осуществление 15 реплик
START 1                                       запуск &I-ой реплики
PUTPIC LINES = 6,FILE =
SYSPRINT,(&I,&FIXERS,&LEASED)
0 = = = = =
Shown above is Replication Report * for this configuration:

Number of repairpersons : *
Number of leased machines : *
= = = = =
CLEAR                                       очистка для проведения следующей
*реплики
ENDDO                                       проведение следующей реплики
ENDDO                                       изменение числа арендованных
*станков
ENDDO                                       изменение числа ремонтников
END                                          окончание процесса ИМ

```

5. Итоговый отчет

В этом разделе (надеясь, что читатель не только не промоделировал работу ткацкой фабрики, но и сам построил МФ, возможно, сняв ряд введенных в начале упрощающих ограничений) не приводим полного листинга отчета, а даем лишь табл. П5.2 основных результатов, главными из которых являются выборочные значения среднего числа продуктивно используемых станков и стандартного отклонения от этого числа по результатам 15 реплик первого этапа для каждой из альтернатив. Во второй части таблицы представлены данные с учетом выборки второго этапа. Данные по объему дополнительной выборки использованы из примера 6.1.

Таблица П5.2

Выборочные статистики 4-х альтернатив

Альтернатива	1	2	3	4
Комбинация x,y	0,1	1,1	0,2	1,2
Среднее значение	7.9584	8.3601	8.8687	9.4850
Отклонение	0.2748	0.3223	0.0542	0.1243
Данные на основе выборки второго этапа				
Среднее значение 2	7.8939	8.339	8.938	9.4667
Отклонение 2	0.2705	0.3189	н/о	0.0802

На основании табл. П5.2 можно оценить потери, получаемые при работе с меньшим числом станков, чем 10, не забывая при этом учитывать стоимость аренды и/или зарплату 2-го ремонтника. Для второго этапа Д/Д процедуры требуются только средние значения, но во второй части таблицы приведены значения и стандартных отклонений. Стандартное отклонение для 3-й альтернативы не вычислялось, потому что выборка второго этапа для нее равна 1 (см. табл. П5.2). Поскольку интересна оценка средней стоимости для каждой альтернативы, то учет арендной платы и зарплат не проводился.

6. Обсуждение

В примере 6.1 амперпеременные (АМП) используются как значение операндов, что указывает на гибкость моделирования на GPSS/H, так как ни одна из прежних версий ЯИМ GPSS этого не позволяет. В МФ использованы три вложенных петли управления – числом ремонтников, числом арендованных станков и числом реплик. Удобство применения петель управления в ЯИМ вообще хорошо иллюстрируется возможностями рассматриваемого примера.

Отметим, что OY STORAGE FIXSHOP расположен в модуле 3, а не в модуле 1, и его емкость определяется АМП. Поскольку количество ремонтников в начальный момент моделирования ничего не определяют, то размещение в модуле 3 не влияет на логику работы, а читается удобней.

В начальный момент времени число арендованных станков равно нулю, а, следовательно, операнд DOB GENERATE Фрагмента 1 также равен нулю, т. е. генератор не инициализирован и транзактов с него не поступает.

Для осуществления реплик второго этапа были введены некоторые дополнения, не отмеченные в представленном МФ:

1. В модуль 1 после OY OPERCOL был введен OY RMULT в виде RMULT 200000 для альтернативы (1,0), после чего для других альтернатив операнд А менялся следующим образом : 300000, 400000, 500000 соответственно для альтернатив (1,1), (0,2), (1,2).

2. Для осуществления каждой из альтернатив приходится изменять операнды АМП в петлях управления (кроме числа реплик), например для альтернативы (1,0)

DO & FIXERS = 1, 1, 1

DO & LEASED = 0, 0, 1.

3. АМП в петле управления числом реплик должна быть изменена на требуемое число дополнительных реплик, например для альтернативы (1,0)

DO & I = 1, 144, 1.

В силу своей уникальности все четыре отдельных МФ были промоделированы в пакетном режиме. Статистические данные были получены с помощью ПО «СТАТИСТИКА» вне тела программы.

Лучшим вариантом выбран вариант, дающий наибольшее использование станков.

Библиографический список

1. *Азгальдов Г. Г.* Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии): Монография. М.: Экономика, 1982. 168 с.
2. *Азгальдов Г. Г.* Квалиметрия. Итоги и перспективы// Стандарты и качество. 1999. № 1. С. 27–31.
3. *Азгальдов Г. Г.* Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании: Монография. М.: Стройиздат, 1989. 215 с.
4. *Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г.* Математико-статистические методы экспертных оценок: Монография. М.: Стандарт, 1980. 263 с.
5. *Варжапетян А. Г., Глущенко В. В.* Системы управления. Исследование и компьютерное проектирование: Монография. М.: Вузовская книга, 2000. 320 с.
6. *Варжапетян А. Г.* и др. Системность процессов проектирования и диагностики технических структур: Монография. СПб.: Политехника, 2004. 186 с.
7. *Варжапетян А. Г.* Имитационное моделирование на GPSS/H: Монография. М.: Вузовская книга, 2004. 340 с.
8. ГОСТ Р ИСО 9000-2001. Системы менеджмента качества. М.: Госстандарт, 2001. 86 с.
9. *Литвак Б. Г.* Экспертные оценки и принятие решений: Монография. М.: Патент, 1996. 190 с.
10. Квалиметрическая экспертиза: Руководство по организации экспертизы и проведению квалиметрических расчетов/ Под ред. *В. М. Маругина, Г. Г. Азгальдова.* СПб., М.: Русский регистр, 2002. 517 с.
11. *Саати Т.* Метод исследования иерархий: Монография. М.: ИЛ, 1992. 256 с.
12. *Субетто И. С., Андрианов Ю. М.* Квалиметрия в приборостроении и машиностроении: Монография. Л.: ЛО «Машиностроение», 1990. 223 с.
13. Искусственный интеллект: Справочник: В 3 т. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1990. 870 с.
14. *Федюкин В. К.* Основы квалиметрии: Учеб. пособие. М.: Финлин, 2004. 296 с.
15. *Шишкин И. Ф., Станякин В. М.* Квалиметрия: Учеб. пособие/ ВЗПИ. М., 1992. 255 с.

Оглавление

Предисловие	3
Глоссарий	5
ВВЕДЕНИЕ	10
1. Общее представление о квалиметрии	10
2. Классификация квалиметрий	15
1. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА	17
1.1. Свойства и потребности	17
1.2. Измерение характеристик качества	21
1.3. Статистические измерительные шкалы	26
1.4. Ряды предпочтительных чисел	36
2. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ	42
2.1. Предпосылки к проведению квалиметрических оценок	42
2.2. Комплексная квалиметрическая оценка	46
2.3. Порядок проведения квалиметрической оценки	54
3. КВАЛИМЕТРИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ	62
3.1. Показатели технической продукции	62
3.2. Принципы принятия решений при оценивании	68
3.3. Методы принятия решений при учете неопределенности информации и нечеткости условий	74
4. ЭКСПЕРТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ	81
4.1. Экспертные оценки в квалиметрии	81
4.2. Недостатки и возможные ошибки экспертного оценивания	84
4.3. Обработка данных экспертизы	87
4.4. Выбор эталона при экспертном оценивании	99
5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ В КВАЛИМЕТРИИ	105
5.1. Понятие интеллектуальной системы	105
5.2. Классификация интеллектуальных систем	108
6. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ КВАЛИМЕТРИИ	117
6.1. Общие представления об имитационном моделировании	117
6.2. Пути снижения дисперсии квалиметрической оценки	124
6.3. Выбор наилучшей альтернативы в Парето-оптимальном множестве	129
Контрольные вопросы	137
Заключение	139
Приложения	141
П.3. Определение неизвестной функции распределения	152
П.4. Определение неизвестной случайной величины	163
П.5. Пример построения модельного файла для примера 6.1 разд. 6.	169
Библиографический список	175