



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗАЦИИ**

Казань 2025

УДК 621.311

ББК

Э45

Эксплуатация и техническое обслуживание систем автоматизации/ сост. Р.Р. Аскарлов, Н.А. Гарифуллина. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2025.

Содержит методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Эксплуатация и техническое обслуживание систем автоматизации», которые определяют порядок выбора обучающимися темы работы, общие требования, предъявляемые к курсовой работе, освещают последовательность ее подготовки и выполнения, требования к структуре, содержанию и оформлению самой работы и научно-справочного аппарата и приложений.

Предназначены для студентов очной и заочной формы обучения по образовательной программе «Цифровые системы автоматизации в электроэнергетике» направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

© Казанский государственный энергетический университет, 2025

Таблица 1

Содержание КР	Объем, стр.
<p>ВВЕДЕНИЕ</p> <p>Во введении следует описать необходимость контроля технического состояния объекта разработки (если разрабатывается устройство автоматизации) или объекта управления (если в дипломной работе автоматизируется энергетический объект – подстанция, КТП или часть электросети и т.п.)</p>	1
<p>1. ЧАСТЬ. ОБЗОРНО-ПОСТАНОВОЧНАЯ</p> <p>Дать общее Описание объекта дипломной работы (как называется для чего предназначен, какие бывают) 2-3 стр.</p> <p>Студент для своего объекта диагностики:</p> <p>а) устройство автоматизации (напр. система сбора данных на базе контроллера)</p> <p>б) энергетическое оборудование (напр. в электроэнергетике силовой трансформатор, вся подстанция, или электродвигатель насоса)</p> <p>объясняет как контролируется надежность 1-2 стр.</p> <p>Постановка задачи – свести к тому, что необходимо контролировать техническое состояние обоснованными методами (средствами) и предложить способы оценки технического состояния. 1 стр.</p>	5-7
<p>2. ЧАСТЬ. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ</p> <p>2.1. Разработка подходов по оценке надежности</p> <p>Выбрать основные элементы объекта, определяющие надежность (найти доказательства из открытых источников) 1-2 элемента (например, масло трансформатора и его вводы или подшипники и изоляция обмоток электродвигателя или контактная система контроллера и транзисторные ключи и т.п.).</p> <p>Математическое описание (текстовая часть)</p> <p>находит (предлагает) способы оценки технического состояния (на разных этапах жизненного цикла: этап создания из компонентов, этап проверки на выпуске, этап ПНР, этап эксплуатации).</p> <p>Необходимо выбрать для объекта статистически независимые диагностические параметры (признаки): всего 3 (например температура масла внутри трансформатора, виброскорость на корпусе электродвигателя, переходное сопротивление контакта на печ.плате) обоснованные.</p> <p>Описывает, как и какими методами/средствами будет осуществляться контроль диагностических параметров (напр. если в КР студентом выбран этап создания из компонентов – то как оценить технические состояния этих элементов до сборки пайки, а если студентом выбран этап эксплуатации, то как будет осуществляться мониторинг объект диагностики)</p> <p>2.2. Структурная схема устройства.</p> <p>2.3. Выбор элементов устройства для диагностики</p>	
<p>3. ЧАСТЬ. РАСЧЕТНАЯ</p>	
<p>3.1. Метод Байеса</p> <p>вводная часть + решение задачи</p> <p>студент находит в открытых источниках исходные данные для решения задачи по этому методу (пример из практ.занятия)</p> <p>диагностическая матрица</p> <p>Рассчитывает вероятности диагнозов при всех возможных проявлениях/отсутствии признаков/параметров</p>	5

таблица результатов 4 и более Выводов	
3.2. Метод минимального риска вводная часть + решение задачи студент находит в открытых источниках исходные данные для решения задачи по этому методу (пример из практ.занятия) Рассчитывает оптимальное браковочное значение 3.2.1. для первого 3.2.2. и второго признака/параметров таблица результатов 4 и более Выводов	5
3.3. Расчет методом минимального риска при наличии зоны неопределенности выбрать исходные данные	5
4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИКИ внедрение в производство или эксплуатацию разработать и описать алгоритм действий для принятия решения по диагностике объекта здесь выбрать примеры внедрения в компании	3
ЗАКЛЮЧЕНИЕ о том что разработана система контроля, выбраны диагностические параметры, приведены примеры расчетов диагнозов при обнаружении диаг.параметров, по методу минимального риска рассчитано браковочное значение для двух параметров, а также граничные значения с зоной неопределенности.	1-2
Итого	25-30

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации показывает, что надежность работы систем автоматизации зависит от многочисленных факторов, которые условно могут быть разделены на четыре группы: конструктивные, производственные, монтажные и эксплуатационные. Конструктивные факторы обусловлены установкой в устройство мало надежных элементов; недостатками схемных и конструктивных решений, принятых при проектировании; применением комплектующих элементов, не соответствующих условиям окружающей среды. Производственные факторы – нарушениями технологических процессов, загрязненностью окружающего воздуха, рабочих мест и приспособлений, слабым контролем качества изготовления и монтажа и др. В процессе монтажа при несоблюдении технологических требований надежность компонентов систем автоматизации может быть снижена. Условия эксплуатации оказывают наибольшее влияние на надежность электротехнических устройств. Ударно-вибрационные нагрузки значительно снижают надежность элементной базы и системы в целом. Воздействие ударно-вибрационных нагрузок может в ряде случаев быть значительнее воздействия других механических, а также электрических и тепловых нагрузок. В результате длительного знакопеременного воздействия даже небольших ударно-вибрационных нагрузок происходит накопление усталости в элементах, что приводит обычно к внезапным отказам. Под воздействием вибраций и ударов возникают многочисленные механические повреждения элементов конструкции, ослабляются их крепления и нарушаются контакты электрических соединений.

Нагрузки при циклических режимах работы, связанных с частыми включениями и выключениями электротехнического устройства, равно как и ударно-вибрационные нагрузки, способствуют возникновению и развитию признаков усталости элементов. Физическая природа повышения опасности отказов устройств при их включении и выключении заключается в том, что во время переходных процессов в их элементах возникают сверхтоки и перенапряжения, значение которых часто намного превосходит (хотя и кратковременно) значения, допустимые техническими условиями. Электрические и механические перегрузки происходят в результате неисправности механизмов, значительных изменений частоты или напряжения питающей сети, загустения смазки механизмов в холодную погоду, превышения номинальной расчетной температуры окружающей среды в отдельные периоды года и дня и т. д. Перегрузки приводят к повышению температуры нагрева изоляции электротехнических устройств выше допустимой и резкому снижению срока ее службы. Климатические воздействия, более всего температура и влажность, влияют на надежность и долговечность любого электротехнического устройства.

При низких температурах снижается ударная вязкость металлических деталей электротехнических устройств: меняются значения технических параметров полупроводниковых элементов; происходит «залипание» контактов реле; разрушается резина.

Вследствие замерзания или загустения смазочных материалов затрудняется работа переключателей, ручек управления и других элементов.

Высокие температуры также вызывают механические и электрические повреждения элементов системы, ускоряя износ и старение. Влияние повышенной температуры на надежность работы компонентов системы проявляется в самых разнообразных формах: образуются трещины в изоляционных материалах, уменьшается сопротивление изоляции, а значит, увеличивается опасность электрических пробоев, нарушается герметичность (начинают вытекать заливочные и пропиточные компаунды).

В результате нарушения изоляции в обмотках электромагнитов, электродвигателей и трансформаторов возникают повреждения. Заметное влияние на работу механических элементов электротехнических устройств оказывает повышенная температура.

Под влиянием влаги происходит очень быстрая коррозия металлических деталей электротехнических устройств, уменьшается поверхностное и объемное сопротивление изоляционных материалов, появляются различные утечки, резко увеличивается опасность поверхностных пробоев, образуется грибковая плесень, под воздействием которой поверхность материалов разъедается и электрические свойства устройств ухудшаются. Пыль, попадая в смазку, оседает на частях и механизмах электротехнических устройств и вызывает быстрый износ трущихся частей и загрязнение изоляции. Пыль наиболее опасна для электродвигателей, в которые она попадает с засасываемым для вентиляции воздухом. Однако и в других элементах электротехнических устройств износ намного ускоряется, если пыль проникает сквозь уплотнения к поверхности трения. Поэтому при большой запыленности особое значение приобретает качество уплотнений элементов электрических устройств и уход за ними.

Качество эксплуатации электротехнических устройств зависит от степени научной обоснованности применяемых методов эксплуатации и квалификации обслуживающего персонала (знание материальной части, теории и практики надежности, умение быстро находить и устранять неисправности и т. п.).

Проведение профилактических мероприятий (регламентные работы, осмотры, испытания), ремонта, использование опыта эксплуатации систем автоматизации обеспечивают их более высокую эксплуатационную надежность.

Таким образом, выполнение курсовой работы по дисциплине «Эксплуатация и техническое обслуживание систем автоматизации» играет важную роль в формировании реализуемых в процессе обучения компетенций:

- способность организовывать и выполнять работы по техническому обслуживанию и эксплуатации оборудования автоматизированных систем управления технологическим процессом;
- способность анализировать данные об осмотрах оборудования и статистику отказов оборудования, описывать причины неисправностей, определять пригодность аппаратуры к дальнейшей эксплуатации;
- способность систематизировать информацию о работе оборудования при авариях и нарушениях нормального режима работы модулей, блоков, узлов оборудования, описывать случаи неправильной работы оборудования.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Над курсовой работой студенты работают под руководством преподавателя в часы, отводимые расписанием для курсовой работы, и самостоятельно – в свободное от занятий время. Основная роль отводится самостоятельной работе студентов. Решение задач, требующих использования средств автоматизации проектирования, выполняется с использованием ПК.

Для контроля хода курсовой работы назначаются контрольные сроки, следующие с интервалом в четыре недели. В течение каждого интервала необходимо выполнить объем работ, относящихся к одному-двум этапам проектирования. При получении задания на курсовую работу студенты составляют календарный график.

Системы контроля технического состояния систем автоматизации в электроэнергетике — это комплекс мероприятий, направленных на получение полной и достоверной информации о текущем состоянии оборудования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) с целью предотвращения неполадок и нарушений работы системы.

Основные методы и подходы к оценке состояния надежности

Все методы оценки состояния надежности можно разделить на несколько ключевых категорий в зависимости от того, что именно и как анализируется.

Статистические и вероятностные методы

Это классическая база для оценки надежности. Они основаны на сборе и анализе статистических данных об отказах, наработке на отказ и других параметрах.

Суть метода: Позволяют рассчитать ключевые показатели надежности (вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднюю наработку до отказа) и на их основе спрогнозировать будущее состояние системы.

Пример: Используются для оценки общего состояния парка однотипного оборудования (например, выключателей) по накопленной статистике их работы и отказов.

Методы на основе искусственного интеллекта

Самый быстроразвивающийся класс методов, особенно эффективный для сложных, нелинейных систем, где сложно построить точную физическую модель.

Нейронные сети: Обучаются на исторических данных. «Увидев» текущие параметры работы системы, нейросеть может определить, соответствует ли это состояние норме или указывает на дефект.

Нечеткая логика: Позволяет работать с качественными и нечеткими понятиями, например, «температура немного выше нормы» или «вибрация заметно усилилась». На основе правил, заданных экспертами, система делает заключение о состоянии объекта.

Гибридные системы (нейро-нечеткие): Комбинируют способность нейросетей к обучению и способность нечеткой логики к интерпретации результатов, что делает оценку более точной и понятной для человека.

Анализ данных из АСУ ТП (SCADA-систем)

Современные АСУ ТП (автоматизированные системы управления технологическим процессом) собирают огромные массивы данных о работе оборудования в реальном времени.

Суть метода: Значения технологических параметров (ток, напряжение, температура, вибрация) непрерывно поступают в SCADA-систему. Их сравнение с заданными модельными или нормативными интервалами позволяет судить о состоянии агрегата.

Пример: Отклонение тока, потребляемого двигателем насоса, от типового графика может свидетельствовать о начинающемся износе подшипников.

Мониторинг остаточного ресурса

Метод, позволяющий перейти от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию.

Суть метода: На основе непрерывного или периодического контроля ключевых параметров (например, содержания газов в масле трансформатора или вибрации турбины) специальные алгоритмы оценивают, сколько времени оборудование еще сможет проработать безотказно. Это ключевой элемент стратегии ТОиР (технического обслуживания и ремонта) по состоянию.

Специализированная диагностика устройств РЗА

Системы релейной защиты и автоматики (РЗА) требуют особого внимания, так как от их правильной работы зависит безаварийная работа всей энергосистемы.

Программно-аппаратные комплексы (напр., «РЕТОМ»): Портативные устройства, которые позволяют персоналу выполнять сложные проверки, испытания и настройку микропроцессорных терминалов РЗА непосредственно на объекте. Они подают тестовые сигналы и анализируют ответ защит.

Анализ аварийных режимов: Метод экспресс-анализа данных с регистраторов аварийных событий и осциллограмм для определения правильности или неправильности срабатывания устройств РЗА после возникновения аварийного режима.

Современные автоматизированные системы контроля (АСК)

Для эффективного управления активами предприятия все перечисленные методы объединяются в рамках единых автоматизированных систем контроля. Эти системы могут быть построены на различных принципах.

Алгоритмы расчета индекса технического состояния (ИТС)

Принцип работы: Это интегральный показатель, рассчитываемый по специальному алгоритму на основе множества параметров. ИТС позволяет автоматизировать процесс и дать однозначную оценку оборудования, даже если доступен ограниченный набор данных.

Системы поддержки принятия решений (СППР)

Принцип работы: Это следующий уровень — не просто расчет индекса, а формирование конкретных рекомендаций. Например, СППР на основе анализа всех данных может предложить: «Высоковольтный ввод №3 требует вывода в ремонт» или «Запланировать диагностику трансформатора на следующий квартал».

Мониторинг цифровых подстанций (по стандарту МЭК 61850)

Принцип работы: На современных цифровых подстанциях управление и контроль строятся на обмене данными по сети. Поэтому методы оценки здесь уникальны — анализируется сам сетевой трафик (протоколы GOOSE и SV). Специальные системы проверяют его целостность, синхронизацию, отсутствие потерь пакетов, что позволяет выявлять сбои в системах автоматики на самом раннем этапе.

Нормативная база и современные тенденции

Интегральный и риск-ориентированный подходы

Современная нормативная база и передовая практика направлены на переход к двум ключевым стратегиям:

Интегральный подход: Заключается в объединении данных из разных источников (АСУ ТП, ручные осмотры, системы мониторинга) для получения полной и достоверной картины состояния объекта.

Риск-ориентированный подход (Risk-Based Maintenance): Это философия управления, при которой приоритет ремонтов и проверок определяется не календарным планом, а оценкой риска отказа оборудования. Ресурсы (финансовые, человеческие) направляются в первую очередь на те объекты, где вероятность отказа высока, а его последствия наиболее серьезны.

Цифровые двойники

Одна из самых перспективных тенденций. Цифровой двойник — это точная виртуальная модель физического объекта (подстанции, турбины, трансформатора), которая обновляется в реальном времени по данным с датчиков. Сравнивая поведение реального оборудования с моделью, можно с высокой точностью обнаруживать аномалии, прогнозировать развитие дефектов и моделировать различные сценарии эксплуатации. Это фактически «песочница» для инженеров, позволяющая виртуально испытывать оборудование без риска для реального.

Таким образом, арсенал методов для оценки технического состояния в электроэнергетике очень широк. Он простирается от проверенных временем статистических моделей до передовых систем искусственного интеллекта и цифровых двойников. Эффективность работы любого энергопредприятия сегодня напрямую зависит от того, насколько грамотно оно комбинирует эти методы для перехода к обслуживанию оборудования по его реальному состоянию, а не по шаблонному календарному графику.

Если вас интересует какой-либо из описанных методов более подробно или есть другие вопросы по теме, я готов предоставить дополнительную информацию.

Пример. Пусть требуется определить состояние шлицевого соединения валов редуктора в эксплуатационных условиях. При большом износе шлицев появляются перекосы и усталостные разрушения. Непосредственный осмотр шлицев невозможен, так как требует разборки редуктора, т.е. прекращения эксплуатации. Неисправность шлицевого соединения может повлиять на спектр колебаний корпуса редуктора, акустические колебания, содержание железа в масле и другие параметры.

Задача технической диагностики состоит в определении степени износа шлицев (глубины разрушенного поверхностного слоя) по данным измерений ряда косвенных параметров. Как указывалось, одной из важных особенностей технической диагностики является распознавание в условиях ограниченной информации, когда требуется руководствоваться определенными приемами и правилами для принятия обоснованного решения.

Состояние системы описывается совокупностью (множеством) определяющих ее параметров (признаков). Разумеется, что множество определяющих параметров (признаков) может быть различным, в первую

очередь, в связи с самой задачей распознавания. Например, для распознавания состояния шлицевого соединения двигателя достаточна некоторая группа параметров, но она должна быть дополнена, если проводится диагностика и других деталей.

Распознавание состояния системы — отнесение состояния системы к одному из возможных классов (диагнозов). Число диагнозов (классов, типичных состояний, эталонов) зависит от особенностей задачи и целей исследования.

Часто требуется провести выбор одного из двух диагнозов (дифференциальная диагностика или дихотомия); например, «исправное состояние» и «неисправное состояние». В других случаях необходимо более подробно охарактеризовать неисправное состояние, например повышенный износ шлицев, возрастание вибраций лопаток и т.п. В большинстве задач технической диагностики диагнозы (классы) устанавливаются заранее, и в этих условиях задачу распознавания часто называют задачей классификации.

Совокупность последовательных действий в процессе распознавания называется *алгоритмом распознавания*. Существенной частью процесса распознавания является *выбор параметров*, описывающих состояние системы. Они должны быть достаточно информативны, чтобы при выбранном числе диагнозов процесс разделения (распознавания) мог быть осуществлен.

Математическая постановка задачи

В задачах диагностики состояние системы часто описывается с помощью комплекса признаков

$$K = (k_1, k_2, \dots, k_j, \dots, k_v),$$

где k_j - признак, имеющий m_j разрядов.

Пусть, например, признак k_j представляет собой трехразрядный признак ($m_j=3$), характеризующий величину температуры газа за турбиной: пониженная, нормальная, повышенная. Каждый разряд (интервал) признака k_j обозначается k_{js} , например повышенная температура за турбиной k_{j3} . Фактически наблюдаемое состояние соответствует определенной реализации признака, что отмечается верхним индексом *. Например, при повышенной температуре реализация признака $k_j^* = k_{j3}$.

В общем случае каждый экземпляр системы соответствует некоторой реализации комплекса признаков:

$$K^* = (k_1^*, k_2^*, \dots, k_j^*, \dots, k_v^*).$$

Во многих алгоритмах распознавания удобно характеризовать систему параметрами x_j , образующими v - мерный вектор или точку в v - мерном пространстве:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_v).$$

В большинстве случаев параметры x_j имеют непрерывное распределение. Например, пусть x_j - параметр, выражающий температуру за

турбиной. Предположим, что соответствие между параметром x_j ($^{\circ}\text{C}$) и трехразрядным признаком k_j таково:

< 450	k_{j1}
$450-550$	k_{j2}
> 500	k_{j3}

В данном случае с помощью признака k_j получается дискретное описание, тогда как параметр x_j дает непрерывное описание. Отметим, что при непрерывном описании обычно требуется значительно больший объем предварительной информации, но описание получается более точным. Если, однако, известны статистические законы распределения параметра, то необходимый объем предварительной информации сокращается.

Из предыдущего ясно, что принципиальных отличий при описании системы с помощью признаков или параметров нет, и в дальнейшем будут использованы оба вида описания.

Как указывалось, в задачах технической диагностики возможные состояния системы — диагнозы D_i — считаются известными.

Существуют два основных подхода к задаче распознавания: *вероятностный* и *детерминистский*. *Постановка задачи* при вероятностных методах распознавания такова. Имеется система, которая находится в одном из n случайных состояний D_i . Известна совокупность признаков (параметров), каждый из которых с определенной вероятностью характеризует состояние системы. Требуется построить *решающее правило*, с помощью которого предъявленная (диагностируемая) совокупность признаков была бы отнесена к одному из возможных состояний (диагнозов). Желательно также оценить достоверность принятого решения и степень риска ошибочного решения.

При детерминистских методах распознавания удобно формулировать задачу на геометрическом языке. Если система характеризуется ν -мерным вектором X , то любое состояние системы представляет собой точку в ν -мерном пространстве параметров (признаков). Предполагается, что диагноз D_i соответствует некоторой области рассматриваемого пространства признаков. Требуется найти решающее правило, в соответствии с которым предъявленный вектор X^* (диагностируемый объект) будет отнесен к определенной области диагноза. Таким образом задача сводится к разделению пространства признаков на области диагнозов.

При детерминистском подходе области диагнозов обычно считаются «непересекающимися», т.е. вероятность одного диагноза (в область которого попадает точка) равна единице, вероятность других равна нулю. Подобным образом предполагается, что и каждый признак либо встречается при данном диагнозе, либо отсутствует.

Вероятностный и детерминистский подходы не имеют принципиальных различий. Более общими являются вероятностные методы, но они часто требуют и значительно большего объема предварительной информации. Детерминистские подходы более кратко описывают существенные стороны процесса распознавания, меньше зависят от избыточной, малоценной информации, больше соответствуют логике мышления человека.

Основное преимущество статистических методов распознавания состоит в возможности одновременного учета признаков различной физической природы, так как они характеризуются безразмерными величинами - вероятностями их появления при различных состояниях системы. В этом разделе содержится подробное изложение метода Байеса и метода последовательного анализа. Теория статистических решений, составляющая особый раздел статистических методов, рассматривается в следующем разделе.

Метод Байеса

Среди методов технической диагностики метод, основанный на обобщенной формуле Байеса, занимает особое место благодаря простоте и эффективности. Разумеется, метод Байеса имеет недостатки: большой объем предварительной информации, «угнетение» редко встречающихся диагнозов и др. Однако в случаях, когда объем статистических данных позволяет применить метод Байеса, его целесообразно использовать как один из наиболее надежных и эффективных методов.

Основы метода

Метод основан на простой формуле Байеса. Если имеется диагноз D_i и простой признак k_j , встречающийся при этом диагнозе, то вероятность совместного появления событий (наличие у объекта состояния D_i , и признака k_j)

$$P(D_i k_j) = P(D_i) P(k_j/D_i) = P(k_j) P(D_i/k_j).$$

Из этого равенства вытекает формула Байеса

$$P(D_i/k_j) = P(D_i) \frac{P(k_j/D_i)}{P(k_j)}.$$

Очень важно определить точный смысл всех входящих в формулу величин.

$P(D_i)$ - вероятность диагноза D , определяемая по статистическим данным (*априорная вероятность диагноза*). Так, если предварительно обследовано N объектов и у N_i объектов имелось состояние D_i , то

$$P(D_i) = N_i/N.$$

$P(k_j/D_i)$ - вероятность появления признака k_j у объектов с состоянием D_i . Если среди N_i объектов, имеющих диагноз D_i , у N_{ij} проявился признак k_j , то

$$P(k_j/D_i) = N_{ij}/N_i.$$

$P(k_j)$ - вероятность появления признака k_j во всех объектах независимо от состояния (диагноза) объекта. Пусть из общего числа N объектов признак k_j был обнаружен у N_j объектов, тогда

$$P(k_j) = N_j/N.$$

Для установления диагноза специальное вычисление $P(k_j)$ не требуется. Как будет ясно из дальнейшего, значения $P(D_j)$ и $P(k_j/D_i)$, известные для всех возможных состояний, определяют величину $P(k_j)$.

$P(D_i/k_j)$ - вероятность диагноза D_i после того, как стало известно наличие у рассматриваемого объекта признака k_j (*апостериорная вероятность диагноза*).

Обобщенная формула Байеса

Эта формула относится к случаю, когда обследование проводится по комплексу признаков K , включающему признаки k_1, k_2, \dots, k_v . Каждый из признаков k_j имеет m_j разрядов ($k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{js}, \dots, k_{jm_j}$). В результате обследования становится известной реализация признака

$$k_j^* = k_{js}$$

и всего комплекса признаков \mathbf{K}^* . Индекс $*$, как и раньше, означает конкретное (фактическое) значение (реализацию) признака. Формула Байеса для комплекса признаков имеет вид

$$P(D_i/\mathbf{K}^*) = P(D_i) P(\mathbf{K}^*/D_i) / P(\mathbf{K}^*) \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

где $P(D_i/\mathbf{K}^*)$ - вероятность диагноза D_i после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков \mathbf{K} ,

$P(D_i)$ - предварительная вероятность диагноза D_i (по предшествующей статистике),

n - все возможные состояния (диагнозы) исследуемой системы.

Предполагается, что система находится только в одном из указанных состояний и потому

$$\sum_{i=1}^n P(D_i) = 1.$$

Перейдем к определению $P(\mathbf{K}^*/D_i)$. Если комплекс признаков состоит из v признаков, то

$$P(\mathbf{K}^*/D_i) = P(k_1^*/D_i) P(k_2^*/k_1^* D_i) \dots P(k_v^*/k_1^* \dots k_{v-1}^* D_i),$$

где $k_i^* = k_{j_s}$ - разряд признака, выявившийся в результате обследования. Для диагностически независимых признаков

$$P(\mathbf{K}^*/D_i) = P(k_1^*/D_i) P(k_2^*/D_i) \dots P(k_v^*/D_i).$$

В большинстве практических задач, особенно при большом числе признаков, можно принимать условие независимости признаков даже при наличии существенных корреляционных связей между ними.

Вероятность появления комплекса признаков \mathbf{K}^*

$$P(\mathbf{K}^*) = \sum_{l=1}^n P(D_l) P(\mathbf{K}^*/D_l).$$

Обобщенная формула Байеса может быть записана так:

$$P(D_i/\mathbf{K}^*) = \frac{P(D_i) P(\mathbf{K}^*/D_i)}{\sum_{l=1}^n P(D_l) P(\mathbf{K}^*/D_l)}$$

где $P(\mathbf{K}^*/D_i)$ определяется равенствами указанными выше. Из соотношения

$$\sum_{i=1}^n P(D_i/\mathbf{K}^*) = 1$$

(следует понимать: один из диагнозов обязательно реализуется, а реализация одновременно двух диагнозов невозможна).

Знаменатель формулы Байеса для всех диагнозов одинаков, это позволяет сначала определить вероятности совместного появления i -го диагноза и данной реализации комплекса признаков

$$P(D_i \mathbf{K}^*) = P(D_i) P(\mathbf{K}^*/D_i)$$

и затем апостериорную вероятность диагноза

$$P(D_i/\mathbf{K}^*) = P(D_i \mathbf{K}^*) / \sum_{l=1}^n P(D_l \mathbf{K}^*).$$

Диагностическая матрица

Для определения вероятности диагнозов по методу Байеса необходимо составить диагностическую матрицу (табл. 1), которая формируется на основе предварительного статистического материала. В этой таблице содержатся вероятности разрядов признаков при различных диагнозах. Если признаки двух-

Таблица 1

Диагностическая матрица в методе Байеса

	Признак k_j									
	k_1			k_2				k_3		
	$P(k_{11}/D_i)$	$P(k_{12}/D_i)$	$P(k_{13}/D_i)$	$P(k_{21}/D_i)$	$P(k_{22}/D_i)$	$P(k_{23}/D_i)$	$P(k_{24}/D_i)$	$P(k_{31}/D_i)$	$P(k_{32}/D_i)$	
Диаг ноз D_i										$P(D_i)$
D_1	0,8	0,2	0	0,1	0,1	0,6	0,2	0,2	0,8	0,3
D_2	0,1	0,7	0,2	0	0	0,3	0,7	0,1	0,9	0,1
...

разрядные (простые признаки «да - нет»), то в таблице достаточно указать вероятность появления признака $P(k_j/D_i)$. Вероятность отсутствия признака $P(\bar{k}_j/D_i) = 1 - P(k_j/D_i)$

Решающее правило

Решающее правило - правило, в соответствии с которым принимается решение о диагнозе. В методе Байеса объект с комплексом признаков K^* относится к диагнозу с наибольшей (апостериорной) вероятностью:

$$K^* \in D_i, \text{ если } P(D_i/K^*) > P(D_j/K^*) \quad (j=1, 2, \dots, n; i \neq j)$$

(символ \in , применяемый в функциональном анализе, означает принадлежность множеству). Условие указывает, что объект, обладающий данной реализацией комплекса признаков K^* или, короче, реализация K^* принадлежит диагнозу (состоянию) D_i . Приведенное правило обычно уточняется введением порогового значения для вероятности диагноза:

$$P(D_i/K^*) \geq P_i,$$

где P_i - заранее выбранный уровень распознавания для диагноза D_i . При этом вероятность ближайшего конкурирующего диагноза не выше $1 - P_i$. Обычно принимается $P_i \geq 0,9$. При условии

$$P(D_i/K^*) < P_i$$

решение о диагнозе не принимается (отказ от распознавания), в этих случаях требуется поступление дополнительной информации для вынесения решения.

D_i	$P(k_1/D_i)$	$P(k_2/D_i)$	$P(D_i)$
D_1	0,2	0,3	0,05
D_2	0,4	0,5	0,15
D_3	0	0,05	0,8

	$P(k_1/D_i)$	$P(k_2/D_i)$		$P(k_1/D_i)$	$P(k_2/D_i)$		$P(k_1/D_i)$	$P(k_2/D_i)$
1.	0,1	0,3	8.	0,35	0,4	15.	0,03	0,05
2.	0,15	0,3	9.	0,3	0,35	16.	0,02	0,05
3.	0,05	0,3	10.	0,3	0,3	17.	0,01	0,05
4.	0,2	0,25	11.	0,2	0,25	18.	0,05	0,04
5.	0,2	0,2	12.	0,3	0,2	19.	0,05	0,03
6.	0,2	0,15	13.	0,1	0,15	20.	0,05	0,02
7.	0,2	0,1	14.	0,1	0,1	21.	0,05	0,01

Статистические решения для одного диагностического параметра

Правило решения

Пусть производится диагностика состояния газотурбинного двигателя по содержанию железа в масле (параметр x). Задача состоит в выборе значения x_0 параметра x таким образом, что при $x > x_0$ следует принимать решение о снятии двигателя с эксплуатации, а при $x < x_0$ допускать дальнейшую работу.

Так как состояние системы характеризуется одним параметром, то система имеет одномерное пространство признаков. Разделение производится на два класса (дифференциальная диагностика или дихотомия). Условимся считать: D_1 - исправное состояние и D_2 - наличие дефекта. Тогда указанное правило решения состоит в следующем:

при $x < x_0$ $x \in D_1$, при $x > x_0$ $x \in D_2$. (5.1)

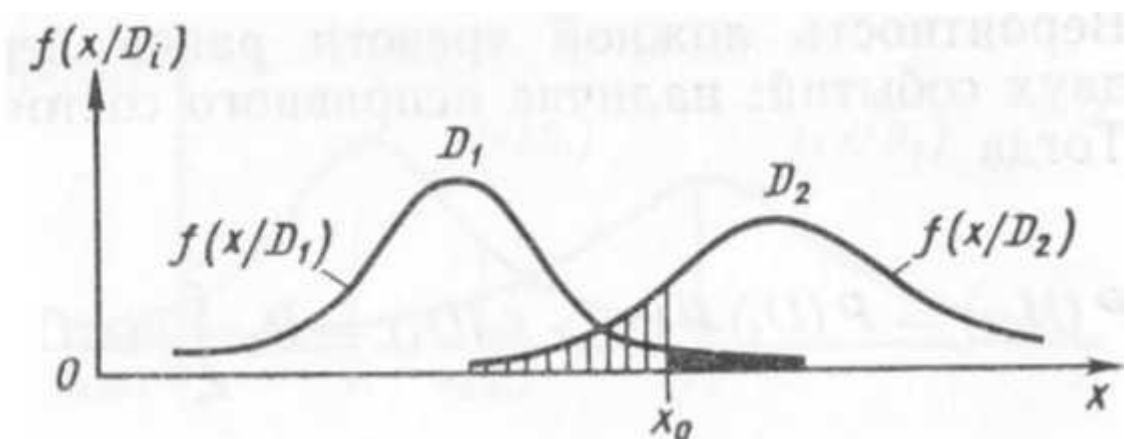


Рис. 3. Статистические распределения плотности вероятности диагностического параметра x для исправного D_1 и дефектного D_2 состояний

Содержание железа в масле неоднозначно характеризует состояние подшипника (в масло попадают железные частицы от других трущихся деталей: шестерен, шлиц и т. д.). В зависимости от ряда факторов распределение x для дефектных и исправных подшипников показано на рис. 3. Существенно, что области исправного D_1 и дефектного D_2 состояний

пересекаются и потому принципиально невозможно выбрать значение x_0 , при котором правило (5.1) не давало бы ошибочных решений. Задача состоит в том, чтобы выбор x_0 был в некотором смысле оптимальным, например давал наименьшее число ошибочных решений.

Рассмотрим возможные ошибки при принятии решения.

Ложная тревога и пропуск цели (дефекта)

Эти встречавшиеся ранее термины явно связаны с радиолокационной техникой, но они легко интерпретируются в задачах диагностики.

Ложной тревогой называется случай, когда принимается решение о наличии дефекта, но в действительности система находится в исправном состоянии (вместо D_1 принимается D_2).

Пропуск цели (дефекта) - принятие решения об исправном состоянии, тогда как система содержит дефект (вместо D_2 принимается D_1).

В теории контроля эти ошибки называются риском поставщика и риском заказчика. Очевидно, что эти двоякого рода ошибки могут иметь различные последствия или различные цены.

Обозначим H_{ij} ($i, j = 1, 2$) возможные решения по правилу (5.1) (первый нижний индекс соответствует индексу принятого диагноза, второй - индексу действительного состояния). Тогда H_{12} - пропуск дефекта и H_{21} - ложная тревога (D_1 - исправное состояние, D_2 - дефектное состояние); H_{11} и H_{22} - правильные решения.

Рассмотрим вероятность ложной тревоги $P(H_{21})$ при использовании правила (5.1) (случай, когда при $x > x_0$ объект является исправным, но по правилу (5.1) рассматривается как дефектный). Площадь под кривой плотности вероятности исправного состояния, соответствующая $x > x_0$, выражает условную вероятность ситуации $x > x_0$ для исправных изделий

$$P(x > x_0 / D_1) = \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1) dx. \quad (5.2)$$

Вероятность ложной тревоги равна вероятности произведения двух событий: наличие исправного состояния и значения $x > x_0$. Тогда

$$P(H_{21}) = P(D_1) P(x > x_0 / D_1) = P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1) dx, \quad (5.3)$$

где $P_1 = P(D_1)$ - априорная вероятность диагноза D_1 (считается известной на основании предварительных статистических данных). Подобным образом находится вероятность пропуска дефекта

$$P(H_{12}) = P(D_2) P(x < x_0 / D_2) = P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2) dx. \quad (5.4)$$

Средний риск

Вероятность принятия ошибочного решения складывается из вероятностей ложной тревоги и пропуска дефекта. Если приписать «цены» этим ошибкам, то получим выражение для среднего риска

$$R = C_{21} P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1) dx + C_{12} P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2) dx. \quad (5.5)$$

Разумеется, цена ошибки имеет условное значение, но она должна учесть предполагаемые последствия ложной тревоги и пропуска дефекта. В задачах надежности стоимость пропуска дефекта обычно существенно больше

стоимости ложной тревоги ($C_{12} \gg C_{21}$). Иногда вводится цена правильных решений H_{11} и H_{22} , которая для сравнения со стоимостью потерь (ошибок) принимается отрицательной. В общем случае средний риск (ожидаемая величина потери) выражается равенством

$$R = C_{11}P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1) dx + C_{21}P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1) dx + C_{12}P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2) dx + C_{22}P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2) dx. \quad (5.6)$$

Величина x , предъявляемая для распознавания, является случайной и потому равенства (5.5) и (5.6) представляют собой среднее значение (математическое ожидание) риска.

Метод минимального риска

Метод минимального риска — это один из фундаментальных подходов теории статистических решений, применяемый для выбора наилучшего правила классификации состояний объекта (например, «работоспособен» или «отказ») при наличии неопределенности. В контексте оценки надежности он позволяет учитывать не только вероятности различных исходов, но и потери (цену ошибок), связанные с неправильными решениями.

Рассмотрим систему, которая может находиться в одном из двух состояний:

- А — объект работоспособен (исправен);
- В — объект неработоспособен (отказ).

В процессе контроля (измерения) мы получаем некоторый параметр x (например, вибрацию, ток, температуру, результат тестирования).

Распределения этого параметра известны из статистических данных:

$f(x/A)$ — плотность вероятности x для исправного состояния,

$f(x/B)$ — плотность вероятности x для отказа.

Также заданы априорные вероятности состояний:

$$P(A) = \pi_A, \quad P(B) = \pi_B = 1 - \pi_A.$$

Ключевая идея метода — введение функции потерь (или стоимостей ошибочных решений). Обычно задают четыре значения:

C_{AA} — потери при правильном распознавании исправного состояния (часто принимают 0);

C_{BB} — потери при правильном распознавании отказа (тоже 0);

C_{BA} — потери, когда объект исправен, но мы принимаем решение об отказе (ложная тревога);

C_{AB} — потери, когда объект неисправен, но мы принимаем решение об исправности (пропуск отказа, самое опасное для надежности).

Формулировка правила минимального риска

Для каждого возможного значения x мы должны принять решение $d(x)$ — отнести объект к состоянию A или B . Средний (байесовский) риск определяется как математическое ожидание потерь:

$$R = \int [P(A)f(x|A)C_{d(x),A} + P(B)f(x|B)C_{d(x),B}] dx.$$

Чтобы минимизировать R , для каждого x выбирается то решение, которое даёт меньший условный риск (подынтегральное выражение). Правило сводится к сравнению двух величин:

$$P(A)f(x|A)C_{BA} \text{ vs } P(B)f(x|B)C_{AB}.$$

Если левая часть меньше правой, выгоднее принять решение «исправен» A , и наоборот.

Отсюда получаем пороговое правило: решение в пользу отказа B принимается, когда

$$\frac{f(x|B)}{f(x|A)} > \frac{P(A)}{P(B)} \cdot \frac{C_{BA}}{C_{AB}} = \lambda_{\text{порог}}.$$

Величина $\lambda_{\text{порог}}$ — порог отношения правдоподобия. На практике часто строят графики плотностей $f(x|A)$ и $f(x|B)$ и находят точку пересечения, скорректированную с учётом априорных вероятностей и стоимостей ошибок.

Применение к оценке надежности

Пример.

Пусть диагностируется авиационный двигатель по уровню вибрации x (в условных единицах). По опытным данным:

- для исправного двигателя

$$f(x|A) \sim N(2, 0.5^2),$$

- для отказа

$$f(x|B) \sim N(4, 0.8^2).$$

Априорная вероятность отказа $\pi_B = 0.05$ (редкое событие).

Потери: ложная тревога $C_{BA} = 1$ (небольшие затраты на дополнительную проверку), пропуск отказа $C_{AB} = 100$ (авария, человеческие жертвы).

Порог отношения правдоподобия:

$$\lambda_{\text{порог}} = \frac{0.95}{0.05} \cdot \frac{1}{100} = 0.19.$$

Решение об отказе принимается, если

$$\frac{f(x|B)}{f(x|A)} > 0.19.$$

Расчёт показывает, что это соответствует порогу по x около 2.7. То есть даже при небольшом превышении вибрации над нормой система сигнализирует об отказе, потому что цена пропуска отказа очень высока. Без учёта потерь (классический байесовский классификатор с равными стоимостями) порог был бы в районе 3.2, что привело бы к большему числу пропущенных отказов.

Преимущества метода:

1. Учёт последствий ошибок — самое важное для ответственных систем (авиация, АЭС, космос).
2. Гибкость — можно менять порог в зависимости от текущей ситуации (например, после планового обслуживания априорная вероятность отказа снижается).
3. Оптимальность — метод гарантирует минимальный средний риск при заданных априорных распределениях и стоимостях.

Недостатки и ограничения метода:

- Требуется точного знания распределений $f(x/A)$ и $f(x/B)$, а также априорных вероятностей — на практике их получают из статистики отказов, что не всегда возможно.
- Субъективность назначения стоимостей потерь — особенно сложно оценить цену человеческих жизней или экологического ущерба.
- При многомерных параметрах (вектор x) вычисление отношения правдоподобия может быть сложным, хотя принцип остаётся тем же.

Метод минимального риска является мощным инструментом оценки надежности, когда необходимо не просто предсказать отказ, а оптимизировать решение с учётом реальных затрат. Он лежит в основе многих систем технической диагностики, контроля качества и управления рисками. При правильном выборе исходных данных и стоимостей ошибок этот метод позволяет существенно повысить безопасность и экономическую эффективность эксплуатации сложных технических объектов.

Найдем граничное значение x_0 в правиле (5.1) из условия минимума среднего риска.

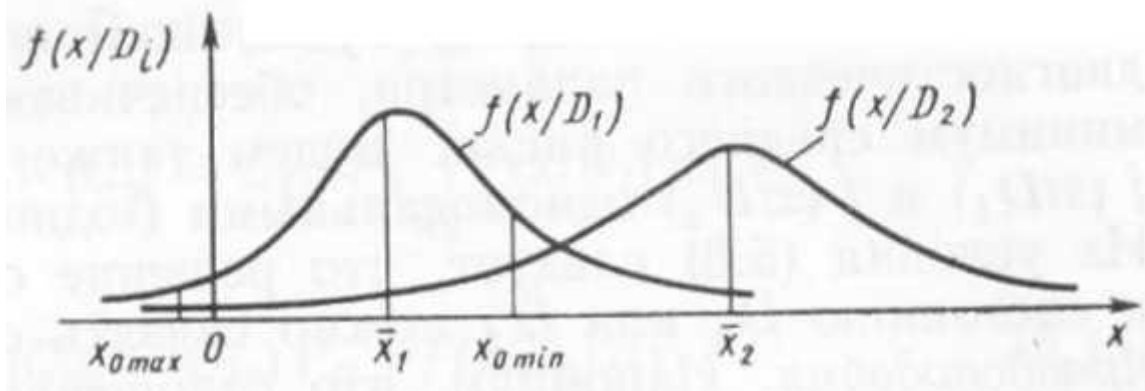


Рис.4. Точки экстремума среднего риска ошибочных решений

Дифференцируя (5.6) по x_0 и приравнявая производную нулю, получим

сначала условие экстремума

$$\frac{dR}{dx_0} C_{11} P_1 f(x_0/D_1) - C_{21} P_1 f(x_0/D_1) + C_{12} P_2 f(x_0/D_2) - C_{22} P_2 f(x_0/D_2) = 0 \quad (5.7)$$

или

$$\frac{f(x_0/D_1)}{f(x_0/D_2)} = \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1} \quad (5.8)$$

Это условие часто определяет два значения x_0 , из которых одно соответствует минимуму, второе - максимуму риска (рис. 4). Соотношение (5.8) является необходимым, но недостаточным условием минимума. Для существования минимума $x = x_0$ вторая производная должна быть положительной $\frac{d^2R}{dx_0^2} \gg 0$, что приводит к следующему условию относительно

производных плотностей распределений:

$$\frac{f'(x_0/D_1)}{f'(x_0/D_2)} < \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1} \quad (5.9)$$

Если распределения $f(x/D_1)$ и $f(x/D_2)$ являются, как обычно, одномодальными (т. е. содержат не более одной точки максимума), то при $\bar{x}_1 < x_0 < \bar{x}_2$ условие (5.9) выполняется. (5.10)

Студент выбирает самостоятельно исходя из сведений об Объекте диагностики значения диагностических параметров (по результатам обзора в источниках информации со ссылкой на этот источник):

эксплуатационные значения

x_1 **min max** (например, ток утечки 100-300 мА)

x_2 **min max** (например, отклонение напряжения 5-10 %)

$\sigma = \text{СКО}_1 = \text{СКО}_2 = (x_{1\max} - x_{1\min})/10$

$P_{2-1} = 0.05$ и $P_{2-2} = 0.15$ априорные вероятности неисправных состояний (дефект 1 и 2)

$P_1 = 0.8$ исправное

$C_{11} = -N_{\text{шт}}$, $C_{22} = -10 \cdot N_{\text{шт}}$, $C_{12} = 2000 \cdot N_{\text{шт}}$, $C_{21} = 60 \cdot N_{\text{шт}}$, $C_0 = 50 \cdot N_{\text{шт}}$

D_i	$P(D_i)$
D_{2-1} неисправное, дефект 1	0,05
D_{2-2} неисправное, дефект 2	0,15
D_1 исправное	0,8

Найти x_{01} и x_{02} по методу минимального риска

Статистические решения при наличии зоны неопределенности и другие обобщения

Правило решения при наличии зоны неопределенности

В некоторых случаях, когда требуется высокая надежность распознавания (большая стоимость ошибок пропуска цели и ложной тревоги),

целесообразно ввести зону неопределенности (зону отказа от распознавания).
 Правило решения будет следующим (рис. 8):
 при $x \leq x_a$ $x \in D_1$, при $x \geq x_b$ $x \in D_2$, при $x_a < x < x_b$ (6.1)
 отказ от распознавания.

Разумеется, отказ от распознавания является нежелательным событием. Он свидетельствует, что имеющейся информации недостаточно для принятия решения и нужны дополнительные сведения.

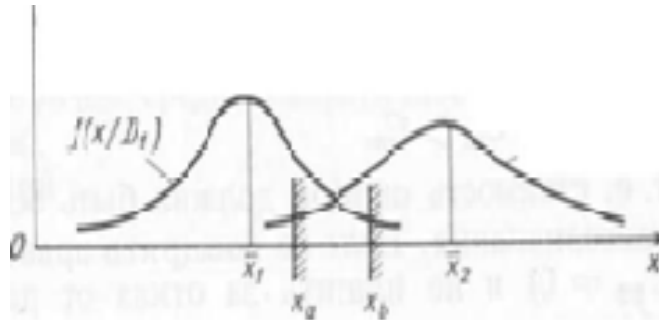


Рис 8. Статистические решения при наличии зоны неопределенности

Определение среднего риска

Величина среднего риска при наличии зоны отказа от распознавания может быть выражена следующим равенством (см. п.5):

$$\begin{aligned}
 R = & C_{11}P_1 \int_{-\infty}^{x_a} f(x/D_1) dx + C_{21}P_1 \int_{x_b}^{\infty} f(x/D_1) dx + \\
 & + C_{12}P_2 \int_{-\infty}^{x_a} f(x/D_2) dx + C_{22}P_2 \int_{x_b}^{\infty} f(x/D_2) dx + \\
 & + C_0 \int_{x_a}^{x_b} [P_1 f(x/D_1) + P_2 f(x/D_2)] dx, \quad (6.2)
 \end{aligned}$$

где C_0 - цена отказа от распознавания.

Отметим, что $C_0 > 0$, иначе задача теряет смысл («вознаграждение» за отказ от распознавания). Точно так же $C_{11} \leq 0$, $C_{22} \leq 0$, так как правильные решения не должны «штрафоваться».

Метод минимального риска при наличии зоны неопределенности

Определим границы области принятия решения, исходя из минимума среднего риска. Дифференцируя выражения (6.2) по x_a и x_b и приравнявая производные нулю, найдем

$$\begin{aligned}
 \frac{dR}{dx_a} = & C_{11}P_1 f(x_a/D_1) + C_{12}P_2 f(x_a/D_2) - \\
 & - C_0 [P_1 f(x_a/D_1) + P_2 f(x_a/D_2)]; \quad (6.3) \\
 \frac{dR}{dx_b} = & C_{21}P_1 f(x_b/D_1) + C_{22}P_2 f(x_b/D_2) -
 \end{aligned}$$

$$-C_0[P_1f(x_b/D_1) + P_2f(x_b/D_2)]. \quad (6.4)$$

Из этих уравнений получаем

$$\frac{f(x_a/D_1)}{f(x_a/D_2)} = \frac{(C_{12} - C_0)P_2}{(C_0 - C_{11})P_1}; \quad (6.5)$$

$$\frac{f(x_b/D_1)}{f(x_b/D_2)} = \frac{(C_0 - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_0)P_1}; \quad (6.6)$$

Равенства (6.5) и (6.6), выражающие необходимые условия экстремума, могут существовать, если их правые части положительны. Для этого необходимо, чтобы

$$C_{12} > C_0; C_{21} > C_0, \quad (6.7)$$

т. е. стоимость ошибок должна быть больше стоимости отказа от распознавания. Если не поощрять правильные решения ($C_{11} = 0, C_{22} = 0$) и не платить за отказ от распознавания ($C_0 = 0$), то область неопределенности будет занимать всю область изменения параметра.

Для существования минимума функции двух переменных $R(x_a, x_b)$ должно быть

$$\frac{d^2R}{dx_a^2} \frac{d^2R}{dx_b^2} - \left(\frac{d^2R}{dx_a dx_b} \right)^2 > 0 \quad (6.8)$$

Вследствие равенства нулю смешанной производной, условия минимума таковы:

$$\frac{f'(x_a/D_1)}{f'(x_a/D_2)} < \frac{(C_{12} - C_0)P_2}{(C_0 - C_{11})P_1}; \quad (6.9)$$

$$\frac{f'(x_b/D_1)}{f'(x_b/D_2)} < \frac{(C_0 - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_0)P_1}; \quad (6.10)$$

Можно показать для «одногорбых» распределений, что при условии

$$\bar{x}_1 < x_a < x_b < \bar{x}_2 \quad (6.11)$$

условия (6.9) и (6.10) выполняются и соотношения (6.5) и (6.6) дают значения x_a и x_b , соответствующие минимуму риска.

Найти x_{01} и x_{02} по методу минимального риска с зоной неопределенности

Алгоритм действий для принятия решения по диагностике объекта

Шаг 1. Определение цели и границ диагностирования

- Четко сформулировать, что считается исправным (D_0) и неисправным (D_1) состоянием.

- Установить контролируемый параметр (или вектор параметров) x который информативен для разделения состояний.

- Определить область допустимых значений параметра по нормативно-технической документации (при наличии).

Шаг 2. Сбор и анализ исходных данных

- Собрать статистические данные:

- Распределения $f(x/D_0)$ и $f(x/D_1)$ (гистограммы, плотности вероятностей).

- Априорные вероятности $P(D_0)$ и $P(D_1)$ (например, из статистики отказов).

- Если данных недостаточно – использовать экспертные оценки или аналоги.

Шаг 3. Назначение стоимостей ошибок и неопределенности

- Задать стоимость ложной тревоги C_{10} (объект исправен, но решаем «неисправен»).

- Задать стоимость пропуска отказа C_{01} (объект неисправен, но решаем «исправен»).

- При необходимости ввести стоимость отказа от распознавания C_0 (если допускается зона неопределенности).

Шаг 4. Выбор критерия принятия решения

Выбрать один из подходов:

Критерий	Когда применять	Результат
Минимум среднего риска (без зоны неопределенности)	Есть точные стоимости ошибок, нужно всегда принимать решение	Один порог $x_{\text{дорог}}$
Минимум риска с зоной неопределенности	Цена ошибки высока, лучше иногда отказываться от решения	Два порога: x_2 (нижний) и x_1 (верхний)
Критерий Неймана-Пирсона	Фиксируем допустимую вероятность ложной тревоги, максимизируем обнаружение	Один порог, но на основе заданного уровня α
Максимум апостериорной вероятности (МАР)	Стоимости ошибок неизвестны, известны априорные вероятности	Один порог (отношение правдоподобия сравнивается с $P(D_0)/P(D_1)$)

Шаг 5. Расчет пороговых значений

- Для одномерного параметра с нормальными распределениями:

- Вычисляются пороги x_2 и x_1 по формулам через отношение правдоподобия.

- В зоне $x_2 < x < x_1$ – неопределенность.

- Для многомерного параметра – используются решающие правила (например, линейный дискриминант Фишера, нейросеть) с последующим вычислением эквивалентного порога.

Шаг 6. Измерение текущего значения параметра

- Провести измерение (или серию измерений) параметра $x_{\text{тек}}$ на диагностируемом объекте.

- При наличии шумов – выполнить усреднение или фильтрацию.

Шаг 7. Принятие решения по правилу

Если используется зона неопределенности:

- $x_{\text{тек}} \leq x_2 \rightarrow$ решение: объект исправен (D_0).
- $x_2 < x_{\text{тек}} < x_1 \rightarrow$ решение: отказ от распознавания (требуется дополнительная диагностика или повторное измерение).
- $x_{\text{тек}} \geq x_1 \rightarrow$ решение: объект неисправен (D_1).

Если зона неопределенности не выделяется (один порог $x_{\text{порог}}$):

- $x_{\text{тек}} \leq x_{\text{порог}} \rightarrow D_0$.
- $x_{\text{тек}} > x_{\text{порог}} \rightarrow D_1$.

Шаг 8. Действия по результату решения

Принятое решение	Рекомендуемые действия
Исправен	Продолжение эксплуатации, плановый контроль
Неисправен	Вывод объекта в ремонт, углубленная диагностика, замена
Зона неопределенности	Повторить измерение (возможно, другими приборами). Провести дополнительные тесты. Использовать другой диагностический параметр. Применить экспертную оценку. Если неопределенность сохраняется – принять решение по принципу «предпочтения безопасности» (чаще – считать неисправным, если цена пропуска отказа высока).

Шаг 9. Оценка эффективности алгоритма

- Рассчитать фактические вероятности ошибок на контрольной выборке.
- При необходимости скорректировать пороги (адаптация).
- Задokumentировать логику принятия решения для последующего аудита.

Пример быстрой реализации:

Условие: Контролируется вибрация подшипника. Норма – до 2.5 мм/с, отказ – свыше 4.0 мм/с.

Цена пропуска отказа – очень высока, ложной тревоги – мала.

Действие: Назначаем зону неопределенности 2.5–3.5 мм/с.

Алгоритм:

1. Измерили вибрацию = 2.8 мм/с → зона неопределенности.
2. Повторное измерение через 1 час = 3.1 мм/с – снова зона.
3. Назначить внеплановую вибродиагностику с анализом спектра.
4. Если подтверждается дефект – ремонт; если нет – продолжить наблюдение.

Этот алгоритм может быть реализован как в виде программного модуля в SCADA-системе, так и в виде инструкции для оперативного персонала. Главное – явно задать пороги и правила действий для каждой зоны.