

---

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из главных условий устойчивого развития нефтегазового комплекса Западной Сибири является обеспечение надежности, безопасности и эффективности эксплуатации теплоэнергетического оборудования.

Проблемы повышения надежности, безопасности и эффективности эксплуатации теплоэнергетического оборудования тесно связаны с задачами обновления основных производственных фондов и снижения затрат на проведение ремонтно-восстановительных мероприятий. Значительное повышение стоимости ремонтно-технического обслуживания, запасных частей, монтажных и аварийно-восстановительных работ в условиях дефицита средств диктует необходимость разработки и внедрения новых технологий технического обслуживания. В этих условиях резко возрастают необходимость в научных разработках, направленных на решение задач, связанных с совершенствованием методов и средств оценки технического состояния теплоэнергетического оборудования. Современные системы диагностирования достаточно совершенны с технической точки зрения, однако интерпретация результатов диагностирования по-прежнему остается серьезной проблемой.

Обновление теплоэнергетического оборудования на предприятиях Западной Сибири происходит медленными темпами, и в настоящее время эксплуатируемые установки имеют широкий разброс по времени общей наработки — от сотен до сотен тысяч часов. Предельная выработка ресурса приводит к существенному изменению параметров оборудования, и при этом общепринятые методики оценки

технического состояния агрегатов дают значительную погрешность.

Разрушение или отказ в работе оборудования, вызванные теми или иными причинами, практически неизбежно завершают функционирование любой технической системы. Нередко случаются и катастрофические аварии, т.е. опасность аварии существует всегда.

Обычно к авариям приводят ошибки трех типов:

- технические ошибки, обусловленные неправильными условиями эксплуатации (например, при нагрузках больше допустимых), проектированием и изготовлением, когда элементы конструкции не соответствуют проекту;
- организационные ошибки, вызванные тем, что не предусмотрено организационных мер, предотвращающих технические ошибки;
- недостаток квалификации, связанной с недостаточно хорошою подготовкой персонала для того, чтобы избежать технических и организационных ошибок. Конструктор должен предвидеть риск, который может возникнуть при использовании его конструкции или технической системы.

Технические устройства различного назначения могут быть достаточно эффективными только при условии высокой надежности, которая закладывается при проектировании устройств. Длительное время этого достигали введением разнообразных коэффициентов запаса при расчетах, обеспечивающих облегчение режимов, в которых работали элементы, детали и устройства в целом при выполнении ими своих функций, что приводило к увеличению их срока службы.

Невозможность обеспечения абсолютной безотказной работы оборудования и, как следствие, ее высокой эффективности потребовала изыскания новых путей решения проблемы. И такой путь был найден на стадии эксплуатации. Повышение эффективности эксплуатации технических объектов связано с необходимостью оценки их состояния, это определило формирование нового научного направления, названного технической диагностикой. Следует

заметить, что состояние оборудования в какой-то степени оценивалось и ранее по штатным приборам. Но ограниченная информация об оборудовании затрудняла установление причины нарушения в работе. Поиск дефекта требовал больших затрат времени. Ограниченнная информация зачастую не позволяла обнаружить дефект в объекте, который явно не отражался на его функционировании, регулируемом штатными приборами, но повышал вероятность отказа с течением некоторого времени.

Поэтому для повышения надежности эксплуатации теплоэнергетического оборудования необходимо иметь представление о существующих методах технической диагностики и прогнозирования остаточного ресурса.

**Техническая диагностика** — это дисциплина, занимающаяся установлением и изучением признаков, характеризующих наличие дефектов в оборудовании, устройствах, их узлах, элементах и деталях для прогнозирования возможных отклонений в режимах их работы (или состояния) с разработкой методов и средств для локализации дефектов в технических системах. Следовательно, *назначение диагностики* состоит в предупреждении, распознавании и локализации аварийных состояний элементов технических систем, что приводит к повышению надежности их функционирования. Само слово *диагностика* (от греч. *diagnostos* — способность распознавать) [4].

Диагностика любых инженерных систем, в том числе силового оборудования промышленных предприятий (насосных станций, компрессорных станций, теплоэлектростанций), включает в себя элементы научных исследований, да и сама является в принципе научным исследованием различных систем. В связи с этим данный курс включает в себя общие вопросы научно-исследовательской деятельности, с одной стороны, и приложение общетеоретических положений научного познания к конкретным вопросам, связанным с определением технического состояния энергетического оборудования — с другой.

Диагностирование осуществляется либо человеком непосредственно (например, внешним осмотром, на слух), либо при помощи аппаратуры. Объект и средства

его диагностирования в совокупности образуют систему диагностирования. Взаимодействуя между собой, объект и средства реализуют некоторый алгоритм диагностирования. Результатом является заключение о техническом состоянии объекта — технический диагноз, например: «насос исправен», «станок неработоспособен», «в электродвигателе разрушен подшипник».

Основы теории надежности были сформулированы в 1920-х гг., и на начальном этапе развития она представляла собой прикладной раздел математики. Причиной ее появления явились возрастающие требования к технике и в первую очередь военной.

С начала 1970-х гг. проблеме диагностики и изоляции отказов динамических процессов стали уделять больше внимания. Было изучено и разработано большое количество методологий, основанных на физической и аналитической избыточности.

В последнее время появилось несколько альтернативных решений, позволяющих проводить диагностику отказов в сложных и неопределенных системах. Самым многообещающим из них является использование для моделирования нелинейных динамических систем и диагностики отказов нейронных сетей.

В последнее десятилетие были разработаны несколько эффективных методов обнаружения основных дефектов машин и оборудования по вибрации на этапе их зарождения. Параллельно развивались методы автоматизации алгоритмов диагностики, что позволило ряду производителей диагностических систем заменить программным обеспечением экспертов при решении типовых диагностических задач. Первые автоматические системы вибрационной диагностики были разработаны в 1991–1992 гг. и постоянно совершенствовались [8].

В 1998 г. появилось новое поколение систем автоматической диагностики машин по вибрации, совместно разработанное специалистами России и США и объединившее лучшие свойства как систем мониторинга, так и систем диагностики.

---

# ГЛАВА 1

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИАГНОСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Процесс определения состояния объекта называют диагностированием. Объектом диагностирования может быть узел, устройство, прибор, состояние которого устанавливают. Часть объекта, которую при диагностировании нельзя разделить на более мелкие части, считают элементом.

Результат диагностирования, т.е. заключение о состоянии технического объекта, называют диагнозом.

Состояние объекта оценивают по диагностическим показателям (параметрам или характеристикам). Каждому состоянию соответствует свое значение диагностических показателей. Если объект может выполнить возложенные на него функции, его называют работоспособным, а состояние — работоспособным состоянием. Изменение диагностического показателя недопустимым образом говорит о том, что в объекте возник дефект. В объекте, состоящем из нескольких элементов, дефектом будет нарушение связи или появление лишней связи между элементами. Возникновению дефекта в объекте, состоящем из одного элемента, соответствует потеря работоспособности. Дефект в объекте из нескольких элементов не обязательно приводит к потере работоспособности.

При наличии дефекта объект может сохранять работоспособность или за счет избыточности (структурной, временной, информационной), или за счет того, что потеря работоспособности не всех элементов не приводит к потере работоспособности объекта. Если в объекте возник дефект, но работоспособность не потеряна, это говорит о том, что степень работоспособности объекта снизилась, а следовательно, повысилась вероятность его отказа в дальнейшем.

Совокупность предписаний о выполнении определенных действий в процессе диагностирования называют алгоритмом диагностирования.

Множество алгоритмов, объединяемых единой целью оценки состояния технического объекта, называют программой диагностирования.

В процессе диагностирования в зависимости от условий его выполнения и способностей объекта решают следующие задачи:

- определяют, может ли объект по своему состоянию выполнить возложенные на него функции;
- определяют характер дефекта, возникшего в объекте;
- предсказывают момент времени, когда диагностические показатели достигнут определенного значения, или когда объект потеряет работоспособность.

Первую из задач — определение работоспособности объекта, как правило, обязательно решают при диагностировании объектов любого назначения.

Вторую задачу — поиск возникшего дефекта — решают, если объект утратил работоспособность или работоспособность его значительно снизилась. Целесообразность решения этой задачи определяется возможностью восстановления объекта, т. е. устранением дефекта. Устранить дефект можно только тогда, когда объект ремонтопригоден, т. е. приспособлен к устранению возникающих дефектов, и персонал имеет время и средства для восстановления объекта. Поиск дефекта начинают, как правило, если известно его наличие, но неизвестно, какой именно дефект возник. Иногда осуществляют поиск возможного дефекта. Такую

задачу называют проверкой неисправности объекта. Эта задача характерна для диагностирования объекта в процессе производства.

Третью задачу называют прогнозированием изменения состояния объекта. При ее решении изучают характер изменения диагностических показателей под влиянием внешних и внутренних воздействий и на основе сформировавшихся тенденций предсказывают значения показателей в определенный момент времени.

Наиболее распространены сочетания задач: определение работоспособности (степени работоспособности) и поиск возникшего дефекта; определение работоспособности (степени работоспособности) и прогнозирование изменений состояния.

Первое сочетание возникает, когда диагностируют восстанавливаемый объект. В этом случае на основе полученного диагноза персонал восстанавливает работоспособность объекта.

Второе сочетание соответствует случаю невосстанавливаемого объекта, когда обслуживающий персонал, учитывая диагноз, принимает решение об использовании или режиме использования объекта.

Третье сочетание, когда при диагностировании решают все три основные задачи диагностирования, характерно для восстанавливаемого объекта при необходимости установления срока его безотказного функционирования. Это типично для диагностирования сложных, особо ответственных объектов.

В процессе диагностирования участвуют, как правило, объект диагностирования (ОД), технические средства диагностирования (ТСД), т. е. средства, предназначенные для определения состояния ОД, и человек — оператор (ЧО) (рис. 1.1).

Методология технической диагностики основана на следующих исходных положениях.

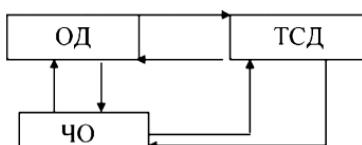


Рис. 1.1  
Структурная схема  
диагностирования

1. ОД может находиться в конечном множестве состояний  $S$ . Состояние ОД под действием внешних факторов и внутренних процессов изменяется непрерывно, но из-за ограниченных возможностей контрольных и измерительных средств на практике фиксируют ограниченное множество состояний  $S$ .

2. В множестве  $S$  выделяют два непересекающихся подмножества  $S_1$  и  $S_2$ :

- $S_1$  — подмножество работоспособных состояний;
- $S_2$  — подмножество неработоспособных состояний.

Подмножество  $S_1 = \{S_i\}$ ,  $i = 1, n$  включает все состояния, которые позволяют объекту выполнить возложенные на него функции. Каждое состояние в этом подмножестве различается степенью или запасом работоспособности, которые характеризуются приближением состояния объекта к предельно допустимому.

Подмножество  $S_2 = \{S_j\}$ ,  $j = 1, m$  включает все состояния, соответствующие возникновению дефектов, приводящих к потере работоспособности объекта. Возможные отказы разделяют на отказы элементов и на изменения структурных связей в объекте.

Мощность подмножества  $S_2$  определяется количеством различных дефектов или глубиной поиска дефектов. Переход из одного состояния в другое зависит от возникновения в объекте дефекта.

3. Решение задач оценки состояния объекта диагностирования сводится к анализу множества  $S$  или подмножеств  $S_1$  и  $S_2$ .

При определении работоспособности осуществляют проверку условий работоспособности, по результатам которой состояние объекта диагностирования относят к одному из подмножеств:  $S_1$  или  $S_2$ .

При поиске возникшего дефекта после установления, что объект неработоспособен, анализируют подмножество  $S_2$  и устанавливают, какому подмножеству  $S_j$  соответствует текущее состояние объекта. При прогнозировании изменения состояния объекта анализируют подмножество  $S_1$ , причем состояниям  $S_i$  и  $S_1$  соответствует вполне определенная степень работоспособности объекта.

Анализ состояния объекта в подмножестве  $S_1$  позволяет установить характер изменения степени его работоспособности, в ряде случаев предсказать момент перехода объекта в подмножество  $S_2$  и, следовательно, прогнозировать состояние объекта. Успех прогнозирования во многом определяется изученностью условий эксплуатации и возможностью измерения параметров и характеристик, описывающих временные изменения состояния объекта.

4. Возникновение дефекта не означает, что объект неработоспособен.

Возникновение дефекта приводит к тому, что объект из одного состояния  $S_k$  переходит в другое  $S$ .

Однако при этом условия работоспособности могут не нарушаться в том случае, когда  $S_k$  и  $S$  относятся к подмножеству  $S_i$ , т. е. работоспособный механизм может иметь дефект, так же, как и неработоспособный. Следовательно, заключение о том, что объект работоспособен, не означает, что в нем отсутствуют дефекты, но если объект неработоспособен, то в нем обязательно имеется дефект.

Для технического объекта характерны следующие стадии жизненного цикла: проектирование, производство, эксплуатация и использование, прекращение существования (рис. 1.2).

Под эксплуатацией понимают комплекс мероприятий по обеспечению заданного уровня готовности, под использованием — применение объекта по прямому назначению.

Основная задача — разработать и изготовить объект, состояние которого входит в подмножество  $S_i$ . Для решения этой задачи при проектировании необходимо предусматривать оценку состояния разработанного объекта, делая его контролепригодным. При производстве нужно оценивать состояние комплектующих элементов, добиваясь работоспособности изготавливаемого объекта. При эксплуатации требуется периодически оценивать состояние объекта для принятия решения о его использовании или восстановлении.

На начальном этапе проектирования системы диагностирования необходимо определить периодичность и продолжительность диагностирования.



Рис. 1.2

*Схема жизненного цикла объекта диагностирования:*

СД — система диагностирования; ДО — диагностическое обеспечение.

Чтобы объект был приспособлен к диагностированию, необходимо разработать диагностическое обеспечение, включающее перечень оцениваемых диагностических показателей, методы их оценки, условия работоспособности и признаки наличия дефектов, алгоритмы и программу диагностирования.

При эксплуатации диагностирование выполняют непрерывно или периодически для определения работоспособности агрегата. При необходимости осуществляют прогнозирование или поиск возникшего дефекта для профилактических или восстановительных работ. Диагностирование позволяет обоснованно принимать решения об использовании объекта в требуемый момент времени (устраняет преждевременные переборки, возможность выхода из строя).

Система диагностирования эффективна, когда состояние технического объекта оценивается на всех стадиях его жизненного цикла.

## 1.2. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Энергетическое оборудование может находиться в двух состояниях: исправном и неисправном [4].

Исправное состояние оборудования — когда все параметры этой системы (основные и дополнительные) соответствуют нормативной документации (паспорту).

Неисправное состояние оборудования — это то состояние, в котором хотя бы один из параметров системы не соответствует паспортным характеристикам.

Надежность энергетического оборудования формируется на всех этапах его проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации. Этому соответствует:

- надежность конструктивная (проектная);
- надежность производственная;
- надежность эксплуатационная.

Конструктивная надежность формируется на этапе проектирования и определяется элементной базой, квалификацией проектировщика, адекватным учетом условий эксплуатации и технологических факторов, наличием и учетом данных, необходимых для расчета надежности.

Производственная надежность закладывается в процессе производства оборудования (узлов) и зависит от культуры производства, технологии и квалификации персонала.

Эксплуатационная надежность проявляется в процессе эксплуатации оборудования и зависит от таких фактов, как соответствие реальных условий эксплуатации требованиям нормативно-технической и конструкторской документации, организации технического обслуживания и квалификации обслуживающего персонала.

Надежность энергетического оборудования определяется:

- безотказностью;
- долговечностью;
- ремонтопригодностью;
- сохраняемостью.

В процессе эксплуатации энергетического оборудования происходит частичная или полная потеря работоспособности агрегатов (т. е. отказ). Отказы вызваны действием

различных причин: спецификой конструкции, отклонениями при изготовлении, естественным старением, особенностями эксплуатации, физико-механическими характеристиками рабочих тел и природно-климатическими условиями.

Изменение работоспособности оборудования в процессе эксплуатации в общем виде имеет вид, представленный на рисунке 1.3.

То есть периодически происходит потеря работоспособности, снижение мощности, КПД и т. п. Интенсивность изменения характеризуется углом наклона правых линий, наклон левых линий соответствует скорости восстановления характеристик оборудования при его ремонте до первоначального уровня.

В настоящее время оценка показателей надежности оборудования осуществляется системой показателей, основанных на определении времени нахождения агрегата в том или ином эксплуатационном состоянии: суммарном времени нахождения агрегата в работе  $T_p$  за отчетный период  $T_k$ ; времени нахождения агрегата в резерве  $T_{рез}$ ; времени нахождения агрегата в плановом ремонте  $T_{ппр}$ ; времени вынужденногоостояния  $T_b$  агрегата за отчетный период  $T_k$ . Обычно за отчетный период принимается календарный год [12]:

$$T_k = T_p + T_{рез} + T_{ппр} + T_b = 365 \text{ дней.} \quad (1.1)$$

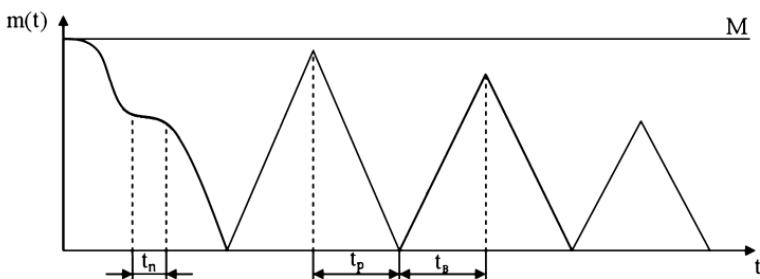


Рис. 1.3

*Изменение работоспособности машин при эксплуатации:*

$M$  — первоначальный уровень работоспособности;  $t_b$  — время восстановления ресурса;  $t_p$  — время работы;  $t_n$  — времяостояния.

На основе сопоставления приведенных временных состояний агрегата и определяются показатели его надежности [12].

1. Коэффициент технического использования агрегата, определяемый как отношение времени пребывания оборудования в работе к общему времени пребывания агрегата в работоспособном состоянии, времени его вынужденных простоев и ремонтов за рассматриваемый период эксплуатации:

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_p}{T_p + T_{\text{ппр}} + T_b}. \quad (1.2)$$

2. Коэффициент готовности агрегата, определяемый как отношение времени нахождения оборудования в работоспособном состоянии к сумме времени нахождения его в рабочем состоянии и времени вынужденного простоя:

$$K_g = \frac{T_p}{T_p + T_b}. \quad (1.3)$$

3. Коэффициент оперативной готовности, определяемый как отношение времени нахождения оборудования в работе или в резерве, к общему календарному отрезку времени:

$$K_{\text{ог}} = \frac{T_p + T_{\text{рез}}}{T_k}. \quad (1.4)$$

4. Коэффициент, характеризующий среднюю наработку агрегата на число отказов ( $r$ ) в отчетном отрезке времени:

$$T_o = \frac{T_p}{r}. \quad (1.5)$$

5. Коэффициент, характеризующий время восстановления работоспособности агрегата, определяемый как отношение общего времени вынужденногоостояния оборудования к числу отказов за рассматриваемый отрезок времени:

$$K_B = \frac{T_B}{r}. \quad (1.6)$$

Опыт эксплуатации агрегатов в нефтяной и газовой промышленности показывает, что в настоящее время к силовым агрегатам нового поколения могут быть предъявлены следующие требования: коэффициент технического использования — 0,93–0,95; коэффициент готовности — 0,98–0,985; коэффициент наработки на отказ — 3,5–4,5 тыс. ч; ресурс между средними ремонтами — 10–13 тыс. ч; ресурс между капитальными ремонтами — 20–25 тыс. ч; полный ресурс до списания — 100 тыс. ч.

Надежность представляет собой обобщенный, комплексный показатель и характеризуется: безотказностью, ремонтопригодностью, долговечностью и сохраняемостью, т.е. изделие считается надежным, если отвечает перечисленным требованиям.

Выбор конкретных показателей надежности обусловлен поставленной задачей:

1) при выполнении расчетов и сравнительного анализа надежности возможных различных вариантов схем изделий и его агрегатов, оценке результатов моделирования и лабораторно-стендовых испытаний основными показателями надежности являются: интенсивность отказов, наработка на отказ, вероятность безотказной работы — характеристики безотказности;

2) при общей оценке уровня надежности изделия, динамике его изменения в процессе серийного производства, эксплуатации и сопоставлении уровня надежности с другими аналогичными изделиями основными характеристиками надежности являются: показатели безотказности и долговечности, наработка на отказ, ресурс. Основной задачей в этом случае является анализ путей их улучшения при введении новых конструктивных и производственных мероприятий;

3) при оценке уровня эксплуатационно-технических характеристик — в первую очередь эффективность их применения в эксплуатации, используются комплексные показатели надежности: коэффициенты готовности, технического использования, эффективности.

*Безотказность* — свойство агрегата непрерывно обеспечивать работоспособность в течение некоторого промежутка времени (или некоторой наработки).

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)