



## ПРЕДИСЛОВИЕ

**Ш**ирокое применение систем диагностики, обеспечивающих возможности поиска неисправностей механизмов и систем без их разборки, переход от крайне расточительного планово-предупредительного ремонта к ремонту по фактической необходимости, оптимальную регулировку механизмов и прогнозирование их состояния, является важным направлением повышения эффективности использования автомобилей и других технических систем.

В настоящее время разработка процедур диагностики с целью определения и прогнозирования состояния технической системы чаще всего базируется на инженерной интуиции разработчиков продукции или практическом опыте специалистов, занимающихся ее эксплуатацией. Это не всегда позволяет получить оптимальные результаты. Научный подход к разработке систем диагностики более проработан для изделий радиоэлектронной промышленности, а проблемам диагностики механических систем (двигателей, автомобилей, технологического оборудования, машин и т. п.) незаслуженно уделено меньше внимания.

В данном учебном пособии рассмотрены вопросы, входящие в круг профессиональных компетенций специалиста (бакалавра и магистра) по направлению подготовки ФГОС ВПО 190600 «Эксплуатация транспортных машин и комплексов». В соответствии с требованиями образовательного стандарта специалист должен знать условия и правила рациональной эксплуатации транспортной техники, причины и последствия ее отказа, уметь разрабатывать и при-

менять различные технологии и формы организации диагностики, технического обслуживания и ремонта транспортных и технологических машин и оборудования. Автор книги приводит информацию по всем этапам разработки системы диагностирования, от классификации видов технической диагностики до рекомендаций по разработке интерфейса компьютерных программ диагностических систем с элементами искусственного интеллекта. Обобщенно в качестве объекта диагностирования принята техническая система как упорядоченная совокупность элементов, связанных между собой функционально и взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить достижение некоторых заданных целей. Этому определению соответствует и автомобиль в целом, и его отдельные агрегаты и системы.

Значительное место в книге отводится выбору признаков состояния технической системы и методам их контроля с преобразованием информации в электрический сигнал, что обеспечивает возможность создания автоматизированных систем диагностики. Успешность диагностирования во многом определяется возможностью достоверно контролировать признаки состояний объекта, поэтому разработчик системы и диагност должны хорошо представлять принципы работы измерительных датчиков и условий создания эффективных измерительных систем. Далее изложены теоретические основы технической диагностики — методы распознавания состояния объекта. Такие методы относятся к области кибернетики, искусственного интеллекта, системного анализа и обработки информации. Задачей автора было представление этих методов в форме, доступной для понимания инженера-механика. Математизация инженерных знаний является неизбежным процессом, связанным с развитием техники и, в частности, автомобилей, в конструкции которых все более широко используются электронные системы управления двигателем, трансмиссией, тормозной системой и т. д.

Создание автоматизированных систем диагностики с элементами искусственного интеллекта повышает эффективность и упрощает процесс диагностирования, что позволяет решить острую проблему нехватки квалифицирован-

ных диагностов. Для распознавания состояния объекта в книге предлагаются примеры алгоритмов компьютерных программ, позволяющих автоматизировать систему диагностики и обеспечить ее самообучение. Даны представления об интерфейсе таких программ и организационных формах взаимодействия производителей автомобилей, автотранспортных предприятий и станций технического обслуживания в рамках реализации централизованной системы диагностики.

При написании учебного пособия использовалась широко известная книга И. А. Биргера и другие источники, указанные в списке литературы, а также разработки автора по новым способам диагностирования с использованием коэффициентов парной корреляции признаков, конкордации результатов диагностирования однотипных элементов и метод диагностирования усталостных разрушений путем контроля состояния «детали-свидетеля».

Книга может быть использована при подготовке специалистов не только по направлению 190600, но и по другим техническим специальностям, а также может оказать существенную помощь аспирантам и разработчикам автоматизированных диагностических систем.

# ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ДИАГНОСТИКЕ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

## 1.1. СОДЕРЖАНИЕ И ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

*Технической диагностикой* называют область знаний, которая изучает признаки, методы и средства определения технического состояния механизмов и других изделий и систем без их разборки, т. е. в условиях ограниченных возможностей получения информации.

При определении технического состояния объекта решаются три типа задач:

- задача диагностики: определение состояния, в котором объект находится в настоящий момент;
- задача прогнозирования: предсказание состояния, в котором объект окажется в некоторый будущий момент;
- задача генетики или генезиса: определение состояния, в котором объект находился в некоторый момент в прошлом (необходимо при расследовании аварий, первопричин отказов и неисправностей).

Индивидуальная информация о скрытых и назревающих отказах технической системы позволяет предотвратить их неожиданные возникновения, исключить преждевременный или запоздалый ремонт. С помощью технической диагностики также можно контролировать качество выполнения ремонтных работ и операций технического обслуживания.

Под *системой диагностирования* понимают комплекс, включающий диагностируемый объект, технические средства и алгоритм диагностических работ.

Системы диагностирования можно классифицировать по ряду признаков:

- по характеру связи технических средств с объектом:
  - а) встроенные (являющиеся элементом конструкции объекта);
  - б) выделенные (подключающиеся к объекту в процессе диагностирования);
- по условию съема информации:
  - а) функциональные (диагностирование в процессе нормальной работы объекта);
  - б) тестовые (объект подвергается особому воздействию, чтобы по отклику судить о его состоянии);
- по полноте охвата:
  - а) общие (диагностируется объект в целом);
  - б) локальные (диагностируется отдельный элемент объекта);
- по степени универсальности:
  - а) специальные (объект, технические средства и алгоритм всегда постоянны);
  - б) универсальные (объект, средства и алгоритм диагностирования легко меняются);
- по количеству диагностических параметров:
  - а) однопараметрические (диагноз по одному признаку);
  - б) многопараметрические (диагноз по комплексу признаков);
- по степени участия человека:
  - а) «ручные» (диагноз ставит человек);
  - б) «машинные», или автоматические (диагноз ставится без участия человека).

Процессы диагностирования можно различать по ряду признаков:

1) *по глубине локализации отказов* различают диагностирование системы в целом или определение состояния каждого элемента;

2) *по способу проведения процедуры контроля* диагностирование может быть последовательным и комбинационным. В первом случае выбор каждого следующего теста или окончание процедуры контроля производится с учетом результатов предыдущих проверок. Во втором — истинное состояние диагностируемой системы определяют после проведения всей совокупности (комбинации) заранее выбранных тестов;

3) *по способу оценки при выборе процедур контроля.* Последовательные процедуры контроля обычно оценивают по двум типам критериев оптимальности: минимуму средних затрат на диагностирование и минимуму максимального значения этой величины. Критерием оптимальности комбинаторного поиска обычно служат суммарные затраты на его проведение;

4) *по количеству отказавших элементов.* При априорном определении множеств допустимых состояний диагностируемой системы обычно рассматриваются две гипотезы: а) в системе возможен отказ не более одного элемента; б) возможны произвольные комбинации нескольких отказавших элементов;

5) если допускаются комбинации одновременных отказов, то последовательные процедуры контроля могут сочетаться с *восстановлением* отказавших элементов по мере их обнаружения либо выполняться *без восстановления*. В первом случае процедура осуществляется до полного восстановления технического состояния системы, соответствующего номинальному значению; во втором — до установления состояния каждого элемента, т. е. до идентификации состояния технической системы;

6) *по совокупности элементов, остающихся непроверенными* после диагностирования, различают контроль с полным и неполным охватом элементов системы.

Характерной чертой современных технических систем является все более широкое использование электроники и микропроцессорной техники, на которую возлагаются не только задачи управления системой, но и функции автоматического диагностирования ее технического состояния. Например, *Volvo* разработал «женский» автомобиль, у которого на щитке приборов есть только спидометр и водитель не имеет возможности открыть капот. Состояние всех систем контролирует бортовой компьютер, имеющий радиосвязь со станцией технического обслуживания (СТО). При возникновении потребности технического обслуживания и устранения неисправностей водитель получает приглашение в назначенное время предоставить автомобиль на СТО.

Диагностика сложных систем должна иметь техническое, информационное и математическое обеспечение.

*Техническое обеспечение* представляет собой совокупность устройств получения и обработки информации (диагностические приборы, датчики, сигнализаторы, усилители и т. п.). Важную часть технического обеспечения современных систем диагностики составляют микропроцессорные схемы (ЭВМ), преобразователи аналоговых сигналов в цифровые базы данных, устройства для регистрации и представления диагностической информации.

*Информационное обеспечение* предусматривает наличие необходимого массива восполняемых технических сведений, способы получения, систематизации и хранения диагностической информации. Сюда же можно отнести различные программы — драйверы, обеспечивающие прохождение информационных потоков по отдельным блокам системы диагностирования.

*Математическое обеспечение* является базой алгоритмов распознавания состояний диагностируемых объектов на основе получаемых диагностических параметров.

Техническая диагностика как система включает также *специалистов*, ответственных за принятие решений и способных разрабатывать элементы системы диагностирования.

Фундаментальной основой развития технической диагностики являются две взаимосвязанные и взаимопроникающие теории: контролепригодности и распознавания образов.

*Контролепригодность* — это свойство изделия обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и раннее обнаружение неисправностей и отказов, которое создается конструкцией изделия и поддерживается принятой системой диагностирования. Теория контролепригодности рассматривает вопросы разработки средств и методов получения диагностической информации, автоматизированного контроля и поиска неисправностей.

*Теория распознавания образов* — это раздел технической кибернетики, где рассматриваются вопросы машинного распознавания образов любой природы (геометрических, речевых и т. п.). В технической диагностике данная теория проявляется в алгоритмах распознавания, правилах принятия

решений, разработке диагностических моделей, что позволяет отнести состояние технической системы к одному из возможных классов (диагнозов).

Решение диагностической задачи (отнесение объекта к исправным или неисправным) всегда связано с риском «ложной тревоги» или «пропуском цели», т. е. достоверность получаемых результатов выражается некоторым значением доверительной вероятности. То же относится и к прогнозированию технического состояния изделия по результатам диагностирования.

Умение объективно оценивать и прогнозировать техническое состояние объекта имеет большое практическое значение.

*Конечной целью технической диагностики является повышение надежности технической системы, снижение техногенного риска и повышение технико-экономических показателей системы в условиях ее эксплуатации.*

## 1.2. ВЫБОР ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Техническое состояние диагностируемой системы и ее элементов характеризуется теми или иными физическими явлениями или процессами, проявление которых можно рассматривать как признаки состояния. Признаки состояния могут выражаться количественно на основе измерений, а когда измерения невозможны — то качественно на основе органолептических методов: оценки цвета, запаха, блеска, тембра звучания и т. п. Очевидно, что по мере развития измерительной техники качественные оценки признаков могут переходить в количественные измерения.

Большая часть информации о состоянии объекта может представлять диагностическую ценность. Состав и состояние сред, взаимодействующих с объектом (воздух, охлаждающая жидкость, масло, продукты сгорания топлива и др.), рабочие параметры процессов (частота вращения, температура, давление и т. п.), вибрация, акустическое и тепловое излучение и т. д. — все это может содержать диагностическую информацию. Значение имеют не только величины



параметров в данный момент, но и их изменение во времени (кинетика информативных параметров).

Диагностические параметры могут быть универсальными и специальными. Примерами *универсальных* диагностических параметров являются вибрации и шумы, возникающие при работе механизмов. В общем случае каждая точка конструкции механизма имеет пространственное вибросмещение в виде наложенных элементарных гармонических колебаний различной частоты и амплитуды. Например, для автомобиля причинами возникновения вибрационных перемещений могут быть циклические процессы при работе его агрегатов, собственные колебания элементов конструкции, дорожные воздействия и т. п. Вибрация элементов автомобиля, происходящая в результате рабочих процессов, собственные колебания, соударения и другие факторы вызывают колебания окружающей среды (воздуха), т. е. служат источником акустических колебаний. Источниками звукового шума являются также потоки воздуха при движении автомобиля, струи выхлопных газов и рабочей смеси, поступающей в двигатель. К универсальным диагностическим параметрам можно также отнести тепловые потоки, отражающиеся на температуре элементов механизма. Источниками тепловыделений могут быть рабочие процессы и трение в сопряжениях деталей.

Существенной проблемой применения универсальных диагностических параметров является необходимость разработки методов отделения полезной информации о конкретном объекте от «шумов», присутствующих в регистрируемом сигнале.

Весьма информативными могут быть *специальные* диагностические параметры (компрессия поршневого двигателя, величины напряжений и токов в электрических цепях и т. п.), поскольку они по своей природе наиболее тесно связаны с рабочими процессами диагностируемой технической системы и лучше выделяются на фоне других сигналов.

Следует понимать, что не все признаки могут быть использованы в качестве диагностических параметров, а используемые признаки могут существенно различаться по своей информативности. Например, цвет кузова автомобиля явно

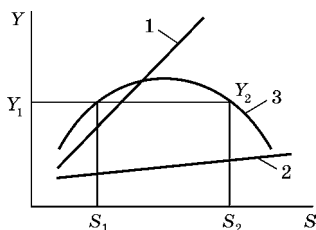
не может быть признаком технического состояния его двигателя, но правомерно ли вообще судить о состоянии двигателя по внешнему виду автомобиля? Отвечая на этот вопрос, можно руководствоваться следующей логикой. Если кузов старый, имеет нарушения лакокрасочного покрытия, коррозионные повреждения кузовных панелей, то вряд ли следует ожидать, что двигатель такого автомобиля находится в идеальном техническом состоянии, — скорее всего, он тоже старый и изношенный. Однако непрезентабельный внешний вид машины не исключает вероятность того, что на ней установлен новый или хотя бы капитально отремонтированный двигатель и он находится в хорошем техническом состоянии.

Если измерить компрессию в цилиндрах, то можно более уверенно судить о состоянии двигателя, чем по внешнему виду автомобиля, поскольку величина компрессии является более информативным диагностическим параметром.

В общем случае при оценке состояния объекта без его разборки в качестве диагностических параметров  $Y_j$  должны выступать косвенные признаки, некоторым образом связанные с состоянием  $S$ . Для того чтобы диагностический параметр был информативным и обеспечивал достоверность диагноза, необходимо, чтобы он отвечал трем требованиям: был чувствительным, однозначным и стабильным.

На рисунке 1.1 показаны три варианта поведения диагностического параметра  $Y$  по мере изменения состояния  $S$ .

Параметры  $Y_1$  и  $Y_2$  — однозначные, поскольку каждому возможному состоянию  $S$  соответствует одна вполне определенная величина признака. Параметр  $Y_3$  неоднозначен, поскольку одно и то же значение признака может соответствовать двум состояниям  $S_1$  и  $S_2$  (или более).



**Рис. 1.1**  
Возможные варианты изменения диагностических параметров:

1 — чувствительный однозначный параметр; 2 — нечувствительный однозначный параметр; 3 — неоднозначный параметр.

Сравнивая параметры  $Y_1$  и  $Y_2$ , можно заметить, что при изменении состояния на величину  $\Delta S$  изменение величины  $\Delta Y$  для первого параметра больше, чем для второго, т. е. первый параметр более чувствительный. Таким образом, из представленных на рисунке 1.1 параметров предпочтительным для диагностики является  $Y_1$ , поскольку он однозначный и чувствительный.

Стабильность диагностического параметра определяется вариативностью его значений при многократных измерениях на объектах с одним и тем же состоянием (в ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 степень близости результатов измерений друг к другу называется прецизионностью).

Разброс значений параметра может быть выражен среднеквадратическим отклонением, которое следует рассчитывать для заведомо исправного и неисправного состояний диагностируемого объекта.

Для оценки стабильности и информативности диагностического параметра можно использовать критерий  $J(y)$ :

$$J(y) = \frac{|\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2|}{\sigma_1 + \sigma_2},$$

где  $\bar{Y}_1$  и  $\bar{Y}_2$  — средние значения диагностических параметров для заведомо исправного и неисправного состояний объекта;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — среднеквадратические отклонения параметров заведомо исправных и неисправных диагностируемых объектов.

Очевидно, что существенное различие признаков исправного и неисправного состояний диагностируемого объекта может дать чувствительный диагностический параметр. Если при этом разброс показаний относительно небольшой, то такой параметр можно считать стабильным и информативным.

Таким образом, при разработке системы диагностирования по величине  $J(y)$  можно выбрать признаки, которые наилучшим образом подходят в качестве диагностических параметров.

Информативность диагностического признака зависит не только от природы взаимосвязи состояния объекта и признака как внешнего проявления состояния, но и от техни-

ческих средств регистрации или количественного выражения признака. Таким образом, диагностические параметры нельзя выбирать без рассмотрения возможностей технического обеспечения системы диагностирования.

### 1.3. ОСНОВНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ И СПОСОБЫ ИХ КОНТРОЛЯ

#### 1.3.1. ТЕМПЕРАТУРА ЭЛЕМЕНТОВ ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Температура является весьма информативным признаком различных процессов функционирования технических систем. Количественно температура выражается посредством температурных шкал, разбивающих температурный диапазон, заданный реперными точками, на определенное количество градусов. Наиболее известны следующие температурные шкалы:

1. Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ): плавление льда —  $0^{\circ}\text{C}$ , кипение воды —  $100^{\circ}\text{C}$ .

2. Кельвина ( $\text{K}$ ): плавление льда —  $273,15\text{ K}$ , кипение воды —  $373,15\text{ K}$ .

3. Реомюра ( $^{\circ}\text{R}$ ): плавление льда —  $0^{\circ}\text{R}$ , кипение воды —  $80^{\circ}\text{R}$ .

4. Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ ): плавление льда —  $32^{\circ}\text{F}$ , кипение воды —  $212^{\circ}\text{F}$ .

Прямое измерение температуры обычно производят ртутными или спиртовыми *термометрами*, работающими на основе принципа расширения тел (жидкостей) при нагреве. Расширяющаяся в колбе жидкость вытесняется в тонкую прозрачную трубку, высота подъема столба жидкости отражает величину температуры. На основе этого эффекта работает также *термоманометр* — спирально изогнутая трубка с запаянной в ней жидкостью. При увеличении объема нагреваемой жидкости трубка выгибается и воздействует на стрелку, указывающую значение температуры на шкале. Подобную конструкцию имеют термометры с биметаллической спирально свернутой пластиной. За счет разности ко-

эффициента температурного расширения различных материалов, образующих биметаллическую пластину, она при нагреве изгибается и воздействует на указывающую стрелку, которая перемещается относительно шкалы прибора.

При диагностических работах замеры с помощью термометров производятся визуально. Для дистанционного измерения температуры контролируемого объекта используют преобразователи температуры в электрический сигнал. Это позволяет не только повысить удобство контроля температуры в различных точках диагностируемого объекта, но и создать интеллектуализированные системы диагностирования, оперирующие в автоматическом режиме электрическими сигналами диагностических параметров, в том числе и температурой.

*Терморезисторы* позволяют контролировать изменение температуры  $\Delta T$  на основе эффекта увеличения электрического сопротивления металлов  $R_T$ :

$$R_T = R_0(1 + \alpha \Delta T),$$

где  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий зависимость сопротивления от температуры. Например, для меди  $\alpha = 4,26 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$ .

Выбор материала терморезистора определяется его стойкостью к среде, в которой предполагается его использовать, и температурным диапазоном. Например, медь рекомендуют использовать в температурном диапазоне от  $-50$  до  $200^\circ\text{C}$ ; платину — от  $-200$  до  $650^\circ\text{C}$ . Для предохранения терморезистора от вредных воздействий его можно изолировать стеклом, фарфором и т. п.

Нужно иметь в виду, что измеренная температура является температурой датчика, которая зависит не только от температуры контролируемой среды, но и от существующего теплообмена. При измерении температуры жидкостей и газов следует учитывать скорости их течения в зоне расположения датчика. Необходимо учитывать также излучения стенок труб, сосудов, т. е. радиационные тепловые потоки, особенно в раскаленных газах. В процессе измерения проходящий через датчик ток сам нагревает терморезистор, поэтому обычно используются малые токи —  $1 \text{ mA}$ , максимум  $10 \text{ mA}$ .

Интерпретация измеренного сигнала, поступающего с выхода системы формирования, существенно упрощается, если он изменяется линейно в зависимости от температуры. Наиболее простой метод линеаризации заключается в подключении к датчику резисторов с постоянным сопротивлением.

Терморезисторы могут включаться в мостовую схему, что существенно повышает точность измерений изменения температуры по отношению к некоторому базовому значению, которое контролируется стандартным прибором — термометром. Терморезисторы могут наклеиваться на поверхность детали. Такие датчики изготавливают фотохимическим методом в виде зигзагообразной или спиральной нити (пленки) обычно из никеля или железоникелевых сплавов. Толщина пленки несколько микронов, размер датчика — около 1 см. В качестве терморезисторов можно также использовать полупроводниковые датчики — позисторы (термисторы), которые при нагревании уменьшают электрическое сопротивление. Они могут быть очень чувствительными, но часто имеют существенно нелинейную характеристику зависимости сопротивления от температуры. Позисторы изготавливают из смеси поликристаллических полупроводниковых металлов ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{ZnTiO}_4$ ). Порошки спекают под давлением в виде дисков, цилиндров; чувствительный элемент может иметь защитную капсулу. Такие датчики могут иметь малые размеры (около 1 мм) и большой температурный диапазон — от очень низких температур до  $300^\circ\text{C}$ .

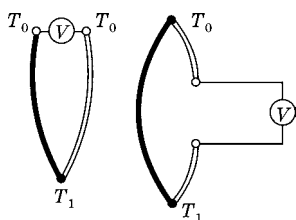


Рис. 1.2  
Схемы

одинарной и двойной  
термопар, работающих  
в комплекте  
с милливольтметром

*Термопара* — это измерительный преобразователь, основанный на эффекте термоэлектричества, возникающего при нагреве спая разнородных материалов. Явление термоэлектричества было открыто в 1823 г. Есебеком (Зеебеком). Принципиальные схемы термопар показаны на рисунке 1.2.

Диапазон температур, в котором применима термопара, от-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)