

**В. И. РАБИНОВИЧ,
М. А. РОЗОВ, Л. С. ТИМОНЕН**
(Новосибирск)

ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ*

Определяется предмет технической диагностики, ее основные задачи и соотношение с другими научными дисциплинами. Дается общая характеристика моделей технической диагностики.

Быстрый прогресс науки и техники, наблюдающийся в два последних десятилетия, и, в частности, широкая автоматизация, охватившая различные стороны человеческой деятельности, явились основной причиной роста сложности технических устройств. В настоящее время созданы технические устройства, насчитывающие десятки и сотни тысяч элементов.

Сложность и важность задач, выполняемых техническими устройствами, большие потери от простоев из-за различного рода неисправностей и возможность аварий с тяжелыми последствиями вызывают постоянный рост требований к безотказной работе этих устройств. Несмотря на успехи, достигнутые в области повышения надежности, полной безотказности в работе технических устройств достичь нельзя. Это объясняется естественным старением и износом элементов устройства. Кроме того, увеличение сложности устройств обычно сопровождается уменьшением надежности. Поэтому особо важное значение приобретают задачи, связанные с восстановлением требуемой работоспособности [1]. Для восстановления работоспособности прежде всего необходимо выявить неисправности в устройстве, т. е. найти те элементы, ненормальное функционирование которых привело к потере работоспособности. Решение этой задачи (задачи диагностики) связано с большими затратами времени и средств, а также требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Поэтому чрезвычайно большое значение имеют исследования по изысканию эффективных и экономичных методов и средств, предназначенных для диагностики технического состояния различного рода объектов.

Примерно с 1955 г. в Советском Союзе [2] и за рубежом [3] ведутся работы по созданию автоматически действующего диагностического оборудования. Известные типы диагностического оборудования предназначены главным образом для автоматической проверки работоспособности и поиска неисправностей в изделиях радиоэлектронной промыш-

* Материал доложен на VI Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1964 г. в Новосибирске.

ленности [3, 4], хотя подобное оборудование имеется и для обслуживания изделий других отраслей производства, в частности, для диагностики автотракторных двигателей без их предварительного демонтажа [5, 6]. Ведутся исследования и по созданию общих методов анализа и синтеза диагностических систем [2, 3], по разработке специфических методов диагностики технического состояния для различного рода устройств, по оптимизации процедур проверки в соответствии с выбранными критериями [4, 7—9], по использованию результатов диагностики для предсказания будущего технического состояния устройств и для установления оптимальной частоты профилактических проверок [3].

Таким образом, в настоящее время проводится комплекс работ, направленных на решение проблем, связанных с диагностикой технического состояния сложных устройств. Представляется целесообразным объединить эти проблемы в одно самостоятельное научное направление, которое можно назвать технической диагностикой.

* * *

Техническую диагностику можно определить как научную дисциплину, занимающуюся изучением закономерностей проявления и возможностей обнаружения неисправностей в сложных системах, а также разработкой принципов и методов обнаружения этих неисправностей. Детализируя данное определение, можно выделить два основных аспекта технической диагностики, отличающихся друг от друга как по предмету изучения, так и по используемым методам: 1) изучение конкретных объектов диагностики, 2) построение и изучение соответствующих математических моделей.

Первый аспект технической диагностики связан с решением следующих основных задач:

- выявление возможных неисправностей системы;
- выделение и классификация симптомов, свидетельствующих о неисправности того или иного конкретного блока или элемента, и основных параметров, характеризующих работоспособность объекта в целом;
- сбор и обработка статистических материалов, характеризующих закономерности проявления неисправностей и возможности их обнаружения или прогнозирования;

- анализ технических возможностей осуществления тех или иных проверок и определение «стоимостей» их осуществления;

- выбор определяющих параметров системы, которые необходимо измерять или контролировать для своевременного обнаружения неисправностей;

- выбор методов измерений и определение необходимой точности последних. Следует при этом отметить, что в качестве контролируемых параметров могут выступать не только величины, подлежащие измерению, но и величины, функционально или статистически с ними связанные.

Второй аспект технической диагностики в отличие от первого связан с изучением не конкретных систем, а соответствующих им математических моделей. Эмпирический материал, собранный и систематизированный в ходе анализа конкретных систем, служит основой для построения этих моделей. В силу сказанного возникающие здесь задачи носят в основном математический характер. Назовем некоторые из этих задач:

- классификация диагностируемых систем (объектов диагностики) в зависимости от характера закономерностей проявления и поиска неисправностей. Опыт показывает, что при построении той или иной теор-

при слишком общий и абстрактный подход в большинстве случаев не оправдывает себя. Как правило, необходимо сужение класса изучаемых явлений, т. е. выделение групп явлений, близких по своему характеру (именно такую цель и должна преследовать указанная классификация);

построение математических моделей, соответствующих определенным классам объектов диагностики;

разработка оптимальных с точки зрения заданных критериев процедур поиска неисправностей в применении к определенной модели или классу моделей;

разработка методов прогнозирования возможных неисправностей в применении к определенной модели или классу моделей.

Очевидно, что оба аспекта технической диагностики тесно друг с другом связаны, причем связь эта носит двухсторонний характер. С одной стороны, эмпирический материал, полученный при анализе конкретных систем, необходим для построения абстрактных моделей и для оценки соответствия этих моделей тому или иному классу систем. С другой стороны, решение теоретических задач, сформулированных в применении к модели, не только важно само по себе, но и дает толчок эмпирическому исследованию систем в определенном направлении, указывает программу такого исследования. Наконец, основная задача технической диагностики, т. е. задача разработки методов анализа и синтеза систем, предназначенных для автоматического поиска и прогнозирования неисправностей, может быть решена только при условии единства эмпирического и теоретического подходов. Очевидно, что нами сформулированы далеко не все задачи технической диагностики, которые могут и должны быть поставлены. Можно сформулировать ряд задач и более частного характера.

Изложенное понимание предмета и задач технической диагностики нуждается в уточнении. В частности, необходимо уточнить ряд таких исходных понятий, как объект диагностики, техническое состояние объекта, проверка, тест, процедура диагностики и т. д. Остановимся только на первом из названных понятий.

В качестве объекта диагностики может выступать любая система, для которой имеет смысл говорить о неисправностях в системе и о проверках, позволяющих установить наличие конкретных неисправностей. Система, выступающая в качестве объекта диагностики, должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Определено, что считать исправным или неисправным состоянием системы.

2. Система состоит из элементов, способных в свою очередь находиться по крайней мере в двух состояниях: «исправен» и «неисправен».

3. Состояние системы в целом может рассматриваться как функция состояний ее отдельных элементов.

Под элементом системы понимается любая из ее составляющих, которая может находиться по крайней мере в двух состояниях: «исправен» и «неисправен», причем имеется одно и только одно неисправное состояние. Любая из составляющих системы, состоящая из нескольких элементов и имеющая соответственно несколько неисправных состояний, называется блоком.

К сказанному необходимо сделать следующие два примечания:

Во-первых, представление объекта диагностики как некоторой дискретной системы, состоящей из отдельных элементов, является, вообще говоря, упрощающей идеализацией. Реальная система может представлять собой практически непрерывное образование, любая условно выделенная часть которого функционирует как блок или как элемент. До-

вольно тривиальный пример такой системы — электрический кабель, рассматриваемый как объект технической диагностики.

Во-вторых, говоря об элементах диагностируемой системы, не всегда можно отождествлять их с «физическими» элементами системы, т. е. с совокупностью частей или деталей, из которых данная система состоит. Дело в том, что каждый из «физических» элементов может в некоторых случаях находиться не в одном, а в нескольких неисправных состояниях. Если дифференциация этих неисправностей входит в задачу диагностики, то каждый такой элемент следует рассматривать как некоторый блок из нескольких элементов. Отсюда следует, что схема объекта диагностики не совпадает, вообще говоря, с обычной функциональной технической схемой.

* * *

К числу научных дисциплин, наиболее близких к технической диагностике, прежде всего необходимо отнести теорию автоматического контроля, теорию измерительных информационных систем и теорию надежности. Все эти дисциплины еще не сформировались окончательно и находятся, как и техническая диагностика, на стадии выяснения основных проблем, перспектив развития и решения некоторых задач. Это определяет в значительной степени характер их сопоставления.

Основная задача технической диагностики — разработка методов анализа и синтеза систем, осуществляющих функции поиска и прогнозирования неисправностей. Содержание этой задачи существенно определяет содержание других задач технической диагностики. Но аналогичные задачи, т. е. задачи разработки методов анализа и синтеза соответствующих систем, ставит перед собой и большинство других технических дисциплин, в том числе и теория автоконтроля и теория измерительных информационных систем. Это сближает перечисленные дисциплины и позволяет свести в значительной степени их сопоставление к сопоставлению соответствующих им систем, т. е. систем диагностики, контроля и измерения.

Начнем с соотношения систем диагностики и контроля. Очевидно, что функционирование этих систем во многом аналогично, хотя и не совпадает полностью. Задача контроля — установить, в каком именно из заранее определенного множества качественно различных состояний находится контролируемый объект. Задачу систем диагностики в самом общем виде можно сформулировать так же.

Специфика каждой из названных систем состоит в том, что объект контроля отнюдь не обязательно должен представлять собой систему в том смысле, как это было определено ранее. Объект контроля обязательно должен удовлетворять первому из требований, предъявляемых к системе, но не обязательно второму, а следовательно, и третьему. Контроль имеет место и в том случае, если мы рассматриваем некоторый объект в целом. Что касается диагностики, то она рассматривает объект не только в целом, но и по элементам. Из сказанного вытекает, что системы технической диагностики — это частный случай систем контроля. Следовательно, теорию автоматического контроля можно рассматривать в ее отношении к технической диагностике как более общую теорию, которая, однако, не охватывает всех задач технической диагностики. Что касается последней, то она включает в себя задачи теории контроля в их конкретном преломлении.

Наконец, измерительные информационные системы можно понимать как системы, для которых характерно получение информации не-

посредственно от объекта путем измерения, более или менее сложная переработка этой информации и выдача ее в форме некоторой совокупности именованных чисел, высказываний, графиков или таблиц, отражающих состояние объекта. Выходные данные системы не ограничиваются при таком понимании результатом, представленным обязательно в форме некоторого именованного числа. Это позволяет чаще всего рассматривать и системы контроля и системы диагностики как частные случаи измерительных информационных систем. С этой точки зрения техническая диагностика — это теория, основное содержание которой составляет разработка методов анализа и синтеза некоторого частного типа измерительных информационных систем.

В заключение остановимся кратко на теории надежности и ее соотношении с технической диагностикой.

Теория надежности изучает любые системы, но с определенной узкой точки зрения, с целью повышения их надежности. В этом плане она связана с любой из рассмотренных выше дисциплин, ибо каждая из них использует ее методы в своих целях. Эта связь, однако, не специфична и не исчерпывает соотношения теории надежности с технической диагностикой. Между этими двумя дисциплинами есть особые и более тесные связи. Прежде всего это обусловлено тем, что построение систем для поиска и прогнозирования неисправностей можно рассматривать как одно из средств повышения надежности.

К чему это ведет? Прежде всего к тому, что у технической диагностики и теории надежности появляется некоторая общая точка зрения на объект. Например, целый ряд таких понятий, как работоспособность, неисправность, отказ, резервирование и т. д., необходимых для характеристики объекта, техническая диагностика заимствует у теории надежности. Кроме того, теория надежности должна рассмотреть построение диагностических систем как одно из средств повышения надежности и разработать методы расчета систем с предусмотренным автоматическим поиском неисправностей.

Все сказанное, однако, не означает, что техническая диагностика является частью теории надежности или наоборот. Это две самостоятельные, хотя и тесно связанные друг с другом дисциплины. Теория надежности дает общую теоретическую базу для решения целого ряда задач как технической диагностики, так и теории контроля и измерительных информационных систем.

* * *

Как уже указывалось выше, предметом исследования в технической диагностике являются реальные технические системы. Но теоретический анализ этих систем всегда предполагает определенную идеализацию, при которой выделяются некоторые существенные (для технической диагностики) черты реальных систем и отбрасываются второстепенные, т. е. реальная техническая система заменяется некоторой моделью. Такая замена позволяет широко использовать формальный аппарат современной математики (в частности, математическую логику, теорию вероятностей, линейное и динамическое программирование) для решения задач технической диагностики.

Особую роль играют модели диагностируемых систем при построении оптимальных процедур поиска неисправностей, проверки работоспособности и профилактической проверки, целью которой является предсказание возможных неисправностей системы. Так, например, в

построение и исследование модели связано с формализацией основных понятий технической диагностики, содержательный смысл которых зависит от того, какой класс реальных систем описывается данной моделью. К таким понятиям относятся: неисправность [11], техническое состояние системы (или элемента), проверка, результат проверки, тест и др.

В математических моделях объектов диагностики предполагается, что для каждого элемента системы задано множество его возможных технических состояний, причем в каждый данный момент времени элемент системы может находиться только в одном из заданного для него множества технических состояний. Во многих задачах, связанных с поиском неисправностей, это множество включает два технических состояния элемента — исправен (или работоспособен), неисправен (или неработоспособен). Очевидно, что данное множество можно расширить, включив в него, например, состояние, характеризующее неустойчивую работу элемента. Техническое состояние системы в целом является функцией от технических состояний ее элементов. В частных случаях оно определяется простым перечислением состояний всех элементов или неисправностей, характерных для данного состояния системы.

Для поиска неисправностей используется проверка, т. е. совокупность операций, производимых над объектом диагностики с целью получения некоторого результата из заданного множества возможных результатов проверок. Результатом проверки может быть значение определенного параметра, некоторая характеристика элемента, блока или системы, определенное высказывание (например, «параметр в зоне допуска»). Каждая отдельно взятая проверка может быть охарактеризована совокупностью элементов, охваченных ею, совокупностью воздействий (испытательных сигналов), необходимых для реализации данной проверки, совокупностью входов, на которые подаются указанные воздействия, совокупностью выходов, с которых снимаются реакции на приложенные воздействия (выходные сигналы). Проверка может производиться и без применения специальных испытательных сигналов в рабочем режиме объекта диагностики. Необходимо отметить, что для различных моделей объектов диагностики формальные определения проверки могут быть неодинаковыми.

Диагностика реальных технических систем всегда предполагает наличие некоторого множества возможных проверок, по результатам которых можно судить о техническом состоянии системы или ее элементов. Очевидно, что если при выполнении всех проверок из данного множества получены одинаковые результаты для двух различных технических состояний системы, то такие состояния неразличимы (т. е. по результатам этих проверок нельзя установить, в каком из двух данных технических состояний находится система). Поэтому задача построения такого множества проверок, на котором различимы все практически важные технические состояния системы или ее элементов, является одной из основных задач технической диагностики. Для определения множества всех возможных проверок широко используются модели объектов диагностики.

Наиболее известной и, по-видимому, первой из опубликованных работ, в которой на основе соответствующей модели рассматриваются методы построения диагностических тестов (т. е. такого множества проверок, которое достаточно для диагностики всех заранее заданных

различных технических состояний системы), является статья И. А. Чегис и С. В. Яблонского [12]. При построении модели предполагалось, что известна функция, которую реализует объект диагностики в каждом из возможных технических состояний, причем эти состояния определялись перечнями возможных неисправностей неслучайного характера. Каждая возможная для данной модели проверка заключается в определении состояния выходов системы при заданном состоянии ее входов. Такая модель была использована авторами для построения тестов, охватывающих как проверку работоспособности, так и диагностику неисправностей контактных схем. Диагностика контактных схем, основанная на этой же модели, получила дальнейшее развитие в работах В. В. Глаголева [13] и И. В. Когана [14].

Модель объекта диагностики, введенная Брюле, Джонсоном и Клетским [7], основана на том, что объект рассматривается как некоторое устройство, состоящее из функциональных элементов. Функциональный элемент — это часть устройства, отвечающая известной реакцией на определенную совокупность воздействий, в число которых могут входить реакции других элементов. Каждый функциональный элемент может находиться в одном из двух несовместимых состояний — годный (или исправный), отказавший (или неисправный). Каждая возможная для данной модели проверка состоит в определении реакции одного из функциональных элементов на заданную совокупность воздействий. Данная модель была использована для построения диагностических тестов и оптимальных процедур диагностики, основанных на условных тестах, т. е. таких, в которых каждая последующая проверка выбирается в зависимости от результатов предыдущих проверок. Отметим, кстати, что понятие «условный тест» было введено в [12]. Некоторое обобщение модели Брюле, Джонсона и Клетского проведено Е. Г. Согомоняном [15]. Можно показать, что приведенные выше модели объектов диагностики эквивалентны с точки зрения методов построения диагностических тестов.

Оптимальную процедуру диагностики можно определить как такой диагностический тест, в котором проверки упорядочены в соответствии с заданным критерием. При построении оптимальных процедур учитываются вероятности всех возможных технических состояний функциональных элементов или неисправностей, определяющих техническое состояние системы в целом, а также затраты (время, стоимость) на проведение каждой отдельной проверки. Сведения о вероятностных характеристиках и затратах должны быть заданы в описании модели.

Оптимальная процедура диагностики, полученная для модели заданного класса технических устройств, служит основой для синтеза диагностической системы, реализующей эту процедуру. Некоторые методы синтеза диагностических систем описаны в [2, 3], однако они требуют дальнейшего развития. Так, например, чрезвычайно перспективным представляется синтез диагностических устройств с гибкими процедурами диагностики, построенными на том принципе, что каждая последующая проверка выбирается в зависимости от результатов предыдущих проверок и от имеющейся априорной информации об объекте диагностики. При синтезе диагностических систем возникает задача получения результата диагностики, обладающего заданной достоверностью. Отметим, что достоверность результатов диагностики можно повысить путем введения в диагностическую систему операций самопроверки, а также введением аппаратурной (резервирование) и методической (процедурной) избыточности.

Современные диагностические системы являются системами дискретного действия, причем разнообразные по своей физической природе параметры объектов диагностики проверяются путем преобразования их в электрические величины. Поэтому развитие и совершенствование автоматических диагностических систем во многом зависит от разработки действующих датчиков, от развития и совершенствования методов измерения и контроля.

Несомненно, что проблематика технической диагностики не исчерпывается перечисленными ранее задачами, и эта новая научная дисциплина открывает исключительно перспективное поле деятельности.

В заключение авторы считают своим долгом выразить глубокую признательность чл.-корр. АН СССР К. Б. Карандееву и д-ру техн. наук М. П. Цапенко за ценные замечания, которые были сделаны при обсуждении данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ремонтпригодность радиоэлектронной аппаратуры. Сборник статей. Под ред. О. Ф. Пославского. М., Изд-во «Советское радио», 1964.
2. Структурная теория релейных устройств. Сборник статей. Под ред. М. А. Гаврилова. М., Изд-во АН СССР, 1963.
3. Автоматическая проверка оборудования самолетов и ракет. Сборник статей. Под ред. В. А. Боднера. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
4. E. J. Klets ky. An Application of the information theory approach to failure diagnosis. IRE Trans., 1960, PRQC—9, № 3. Зарубежная радиоэлектроника, 1961, № 9.
5. Сибирский филиал ВИАМ. Научные труды, вып. 1. Новосибирск, Западно-Сибирское книжное изд-во, 1963.
6. Автоматическая система испытаний и диагностики транспортных средств. Перев. с англ. М., ВИНТИ, 1963.
7. J. D. Brule, R. A. Johnson, E. J. Klets ky. Diagnosis of equipment failures. IRE Trans., 1960, PRQC—9, № 1. Зарубежная радиоэлектроника, 1961, № 7.
8. B. B. Winter. Optimal Diagnostic Procedures, IRE Trans., PRQC—9, № 3. Зарубежная радиоэлектроника, 1962, № 1.
9. R. A. Johnson. An information theory approach to diagnosis. Proc. of 6-th National Symp. of Reliability and Quality Control. Washington, D. C. 1960, Jan. 11—13, p. 102—109.
10. S. J. Firstman, B. Gluss. Optimum search routines for automatic fault location. Operation Research, 1960, 8; № 4. Зарубежная радиоэлектроника, 1963, № 6.
11. R. A. Kir k m a n. Failure concepts in reliability theory. IEEE Trans. on Reliability, 1963, № 4.
12. И. А. Чегис, С. В. Яблонский. Логические способы контроля электрических схем.— Труды Математ. ин-та им. В. А. Стеклова, т. 51. М., Изд-во АН СССР, 1958.
13. В. В. Глаголев. Построение тестов для блочных схем. Докл. АН СССР, 1962, 144, № 6.
14. И. В. Коган. Построение тестов для контактных схем.— Материалы научных семинаров по теоретическим и прикладным вопросам кибернетики, семинар 2. Киев, 1963.
15. Е. С. Согомоян. Контроль работоспособности и поиск неисправностей в функционально связанных системах. Автоматика и телемеханика, 1964, 25, № 6.

*Поступила в редакцию
12 сентября 1964 г.*