

УДК 681.324

А.А. Прокофьев

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Прокофьев Александр Анатольевич, окончил факультет информационных и телекоммуникационных технологий Ульяновского государственного университета. Ведущий инженер ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Область интересов: макропроектирование автоматизированных систем управления специального назначения. Имеет публикации в области проектирования и обеспечения надежности комплексов средств автоматизации. [e-mail: alexxpro@rambler.ru].

Аннотация

В статье представлен обзор основных положений общей теории систем и технической диагностики как теоретической базы для решения проблемы синтеза систем контроля и диагностики (СКД) сложных технических объектов (ТО).

Статья может быть полезна разработчикам сложных технических объектов и систем различного предназначения, не являющимся специалистами в области контроля и диагностики.

Ключевые слова: синтез систем контроля и диагностики, техническая диагностика, сложный технический объект, общая теория систем.

Abstract

The article gives an overview of fundamentals for general theory of systems and technical diagnostics as a theoretical base for solution of problems concerning synthesis of monitoring and diagnostics systems of complex technical objects.

The article can be useful for developers of complex technical objects and systems of different purpose, who are not specialists in the monitoring and diagnostics field.

Key words: synthesis of monitoring and diagnostics systems, technical diagnostics, complex technical object, general theory of systems.

ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ СИНТЕЗА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

Системные исследования проблемы синтеза эффективных систем контроля и диагностики состояния сложных технических объектов являются чрезвычайно актуальными на современном уровне развития техники, поскольку значительный рост сложности вновь создаваемых изделий и их функционирование в жестких условиях эксплуатации выдвигают качественно новые требования к СКД.

Важность решения указанной проблемы подтверждается участвовавшими случаями технических и техногенных аварий с катастрофическими последствиями как для самих ТО, так и для окружающей среды и обслуживающего персонала. Ярким примером из недавнего прошлого может служить авария на Саяно-Шушенской ГЭС. Среди основных причин подобных происшествий — элементарная непригодность эксплуатируемого оборудования к диагностическому контролю, отсутствие средств контроля технического состояния.

Практика эксплуатации различных ТО показывает, что при отсутствии специальных средств поддержки функционирования и контроля основная часть времени восстановления затрачивается на поиск и локализацию отказов, увеличивая тем самым затраты на ремонт и обслуживание. Очевидно, автоматизация процедур контроля и диагностики является одним из основных направлений повышения качества технического обслуживания и эксплуатации ТО.

Системы контроля и диагностики должны обеспечивать повышение эффективности функционирования сложных технических объектов за счет оперативного распознавания их состояния на основе анализа некоторого набора контролируемых параметров. Особое значение имеют точность и своевременность прогнозирования аварийной ситуации с катастрофическими последствиями для людей и окружающей среды. Важными являются глубина и скорость поиска неисправного элемента, минимизация объема контролируемой информации, стоимость и надежность системы контроля и диагностики, снижение вероятности необоснованной остановки объекта из-за ошибки в определении состояния

и другие показатели [1].

Разнообразие известных принципов функционирования и классов ТО определяет широту проблематики синтеза систем контроля и диагностики, в которой исключительным приоритетом в настоящее время обладают вопросы разработки эффективных и надежных методов контроля технического состояния в процессе эксплуатации ТО без нарушения его работоспособности и проведения сборочно-разборочных работ. Основное назначение подобных средств непрерывного и периодического контроля состоит в сокращении времени на поиск неисправных (или потенциально неисправных) элементов и, самое главное, своевременном прогнозировании ухудшения качества функционирования ТО и предотвращении аварийных ситуаций.

Эффективность СКД закладывается уже на ранних этапах разработки ТО. Ошибки, допущенные в самом начале проектирования, часто не могут быть выявлены вплоть до сдачи объекта в эксплуатацию. Проектирование СКД и технического объекта, предусматривающего обеспечение высокой контролеспособности и диагностируемости, должно вестись одновременно.

Статистические данные показывают, что причины неисправностей оборудования практически равномерно распределены между ошибками, возникшими при разработке и производстве, и отказами компонентов под влиянием внутренних и внешних факторов в процессе эксплуатации. Затраты на обнаружение причин сбоев и отказов в зависимости от этапа жизненного цикла ТО возрастают в геометрической прогрессии. Так, если принять стоимость обнаружения дефекта на этапе входного контроля элементов за единицу, то на этапе производства блоков эти затраты составят 10 ед., на этапе заводских испытаний изделий — 100 ед., а на этапе эксплуатации ТО — 1000 единиц и более [2].

Очевидно, что решение проблемы синтеза эффективной системы контроля и диагностики возможно только на основе результатов постижения глубинной функциональной, алгоритмической и структурной организации ТО как открытой системы.

Теоретическими исследованиями вопросов анализа и синтеза сложных систем занимается общая теория систем (ОТС), изучением вопросов контроля и диагностики — теория технической диагностики. В работе представлен анализ теоретических основ данных теорий, с точки зрения решения проблемы синтеза СКД сложных ТО.

Основные положения общей теории систем

Общая теория систем — наука, изучающая общие свойства и закономерности создания, функционирования и развития сложных образований (систем) различной природы.

ОТС как общенаучная теория призвана ре-

шать следующие основные задачи:

1. Описание и формализация исследуемых объектов (систем) в различных формах и с различной степенью обобщения.
2. Раскрытие сущности исследуемых объектов через закономерности их создания, функционирования и развития.
3. Предвидение (прогнозирование) возможных изменений в исследуемых объектах.
4. Разработка методов и средств проведения научных исследований вопросов анализа и синтеза сложных систем.
5. Концептуальное и формальное моделирование сложных систем.

В самом общем случае выделяют (рис. 1) следующие основные элементы ОТС [3]:

- системный анализ, основная задача которого — разработка методологии решения слабоструктурированных проблем в процессе концептуального анализа и синтеза сложных систем;
- кибернетику, изучающую вопросы анализа и синтеза систем управления;
- исследование операций, цель которого — разработка методов (подходов) количественного обоснования принимаемых решений;
- системотехнику, занимающуюся вопросами создания сложных систем (с учетом рекомендаций эргономики и инженерной психологии) и их военно-научного сопровождения в процессе эксплуатации.

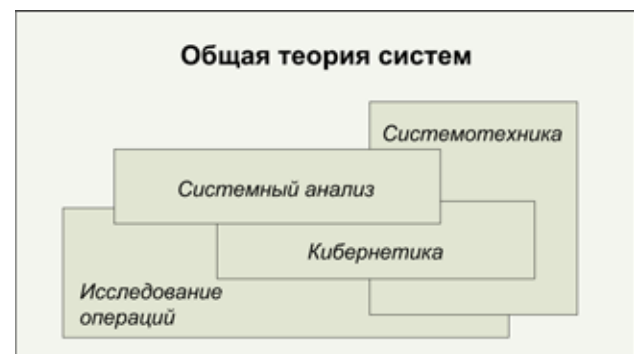


Рис. 1. Взаимосвязь теорий, составляющих ОТС

Как видно из рисунка, такое выделение составляющих ОТС весьма условно в связи с их взаимным проникновением.

Любое исследование начинается, как правило, с общего знакомства с объектом. По мере накопления знаний исследователь более детально представляет сущность как самого объекта исследования, так и процессов, протекающих в нем и в среде, с которой объект взаимодействует. В связи с этим широкое распространение получило многоуровневое стратифицированное описание сложных систем. Переход с одного уровня на другой обеспечивает уточнение и углубление знаний о системе.

Принято различать следующие уровни описания сложных систем [3]:

- логический (абстрактное представление всей системы в целом, из которого видны логика ее работы и основные цели, стоящие перед ней);
- информационный (система представляется в виде совокупности источников и получателей информации, мест ее обработки и хранения, а также путей прохождения информации, то есть описывается информационная структура системы);
- функциональный (описывается совокупность функций, реализуемых системой);
- математический (функционирование системы описывается совокупностью математических выражений — операторов преобразования входа в выход);
- физический (представление системы осуществляется на уровне протекающих в ней процессов).

Использование одного или нескольких уровней описания в общем случае определяется целями исследования, но в процессе анализа и синтеза таких многокачественных систем, как СКД сложных ТО, целесообразно выполнить описание объекта исследования на всех уровнях.

Объекты системных исследований весьма многочисленны и разнообразны. Определение класса, к которому относится исследуемый объект, позволяет существенным образом облегчить проведение исследований.

Для выделения классов систем могут использоваться различные классификационные признаки. Основными из них считаются: природа элементов, происхождение, длительность существования, изменчивость свойств, степень сложности, отношение к среде, реакции на возмущающие воздействия, характер поведения и

степень участия людей в управляющих воздействиях. Классификация систем представлена в таблице 1 [3].

Рассматриваемые в рамках данной работы объекты являются реальными, искусственными, динамическими, сложными, открытыми, активными, техническими или организационно-техническими системами с управлением.

В зависимости от предназначения сложные системы могут быть как временными, так и постоянными. К постоянным системам относится подавляющее большинство естественных систем. При исследовании систем искусственного происхождения к постоянным принято относить те из них, которые в течение заданного времени функционирования сохраняют свои основные (существенные) свойства. Так, например, системе управления войсками в мирное время можно отнести к постоянным, а систему управления силами соединения, создаваемую на время операции, — к временным.

Кроме того, выделяют автоматические и автоматизированные искусственные системы. Первые способны выполнять свои функции без прямого участия человека, вторые — с участием людей.

С точки зрения проблемы контроля и диагностики, все технические объекты можно подразделить еще на два класса.

Первый класс — это технические объекты, описываемые линейными моделями, функционирующие в установившихся, стационарных режимах и характеризующиеся предсказуемым поведением. Такие системы называют детерминированными.

Второй класс — это объекты, функционирующие в жестких условиях, нештатных режимах и

Таблица 1

Классификация систем

№ п/п	Наименование классификационного признака	Значения классификационного признака
1	Природа элементов	Реальные (физические) Абстрактные
2	Происхождение	Естественные Искусственные
3	Длительность существования	Постоянные Временные
4	Изменчивость свойств	Статические Динамические
5	Степень сложности	Простые Сложные
6	Отношение к среде	Открытые Замкнутые
7	Реакция на возмущающие воздействия	Активные Пассивные
8	Характер поведения	С управлением Без управления
9	Степень участия людей в реализации управляющих воздействий	Технические Организационно-технические Организационные

описываемые, как правило, нелинейными уравнениями. Их состояние существенно зависит от параметров окружающей среды и возмущающих воздействий, действующих на систему [1]. Для системного анализа таких систем важной является их классификация по реакции на воздействия.

Системы, реакция которых на внешнее воздействие неоднозначна, но в среднем предсказуема, называют стохастическими. К таким системам, например, может быть отнесена система артиллерийского огня.

Есть системы, реагирующие на внешнее воздействие абсолютно непредсказуемым образом. Это означает, что никакое сколь угодно глубокое знание системы и длительное наблюдение за ней не позволяют точно предсказать ее поведение на сколь угодно короткий интервал времени.

Отдельно принято выделять системы, реакция которых на воздействие непредсказуема из-за беспорядочности внутренних связей. Это хаотические системы.

Большая часть сложных технических объектов, с точки зрения контроля и диагностики, комбинирует в себе свойства перечисленных классов, являясь системами, которые в одних условиях ведут себя как детерминированные, в других — как вероятностные, а в третьих — осуществляют слабо предсказуемый выбор. Но это не означает что их поведение непредсказуемо. При заданных внешних условиях самая сложная система имеет ограниченные возможности выбора поведения. В связи с этим определение ограничений и знание допустимых областей параметров внешней среды и возмущающих воздействий на ТО не только полезно, но и необходимо при синтезе СКД и проектировании самих технических объектов.

Основные положения технической диагностики

Техническая диагностика — наука о распознавании состояния технической системы, включающая широкий круг проблем, связанных с получением и оценкой диагностической информации [4].

Техническая диагностика изучает методы ор-

ганизации процессов определения текущего состояния технических объектов, а также принципы построения программных и аппаратных средств, обеспечивающих диагностирование.

Техническая диагностика решает обширный круг задач, многие из которых являются смежными с задачами других научных дисциплин. Основной задачей этой науки является распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации.

На рисунке 2 показана структура технической диагностики. Она характеризуется двумя взаимопроникающими и взаимосвязанными направлениями: теорией распознавания и теорией контролеспособности. Теория распознавания содержит разделы, связанные с построением алгоритмов распознавания, определением решающих правил и диагностических моделей. Теория контролеспособности включает разработку средств и методов получения диагностической информации, автоматизированный контроль и поиск неисправностей [4].

В общем случае системы контроля и диагностики сложных ТО призваны решать следующие основные задачи [5]:

- задача диагноза — определение состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени (техническая диагностика);
- задача прогноза — предсказание состояния, в котором окажется объект в будущий момент времени (техническая прогностика);
- задача генеза — определение состояния, в котором находился объект в некоторый момент времени в прошлом (техническая генетика).

Техническая диагностика представляет собой основу технической генетики и технической прогностики, и последние развиваются в тесной взаимосвязи с первой.

Задача технической прогностики решается, как правило, с целью определения срока службы оборудования, периодичности проверок и ремонтов, своевременного прогнозирования сбоев, отказов и аварийных ситуаций.

Задачи технической генетики возникают в связи с поиском причин сбоев и отказов оборуду-

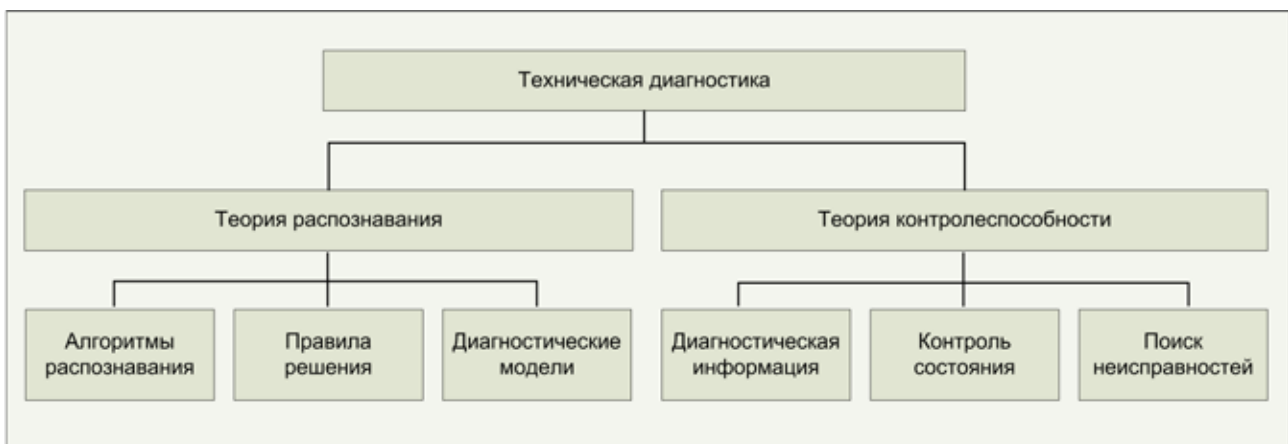


Рис. 2. Структура технической диагностики

дования, расследованием причин аварий и катастроф, определением состояния, в котором ТО находился в прошлом, условий возникновения первопричины, вызвавшей аварию (сбой, отказ).

Одной из важнейших задач контроля и диагностики состояния объекта является поиск неисправностей, указание мест и причин их возникновения. Поиск неисправностей необходим для выявления и замены неисправных компонентов.

В диагностике важным понятием является техническое состояние объекта. Техническое состояние объекта — состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект [6].

В результате эксплуатации технический объект может находиться в одном из следующих технических состояний [6]:

- исправном (изделие соответствует всем требованиям нормативно-технической документации);
- неисправном (изделие не соответствует хотя бы одному требованию нормативно-технической документации);
- работоспособном (значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции во всех режимах, соответствуют требованиям нормативно-технической документации);
- неработоспособном (значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданную функцию, не соответствует требованиям нормативно-технической документации);
- функционирующем (значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции в проверенных режимах, соответствуют требованиям нормативно-технической документации);
- нефункционирующем (значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции в проверенных режимах, не соответствует требованиям нормативно-технической документации).

Исправное и все неисправные состояния объекта образуют множество его технических состояний. Задачи проверки исправности, работоспособности, правильности функционирования и поиска неисправностей представляют собой частные случаи общей задачи технической диагностики ТО.

Физические явления в компонентах устройств, вызвавшие под влиянием внешних или внутренних факторов переход ТО в одно из неисправных состояний, называют дефектами. В зависимости от структуры системы дефект может породить или не породить ошибку (например, в резервированных системах). Ошибка — не всегда следствие дефекта. Однозначного соответствия между ошибками и дефектами в большинстве

случаев не существует. Одна и та же ошибка может быть следствием разных дефектов, а один дефект — причиной ряда ошибок.

При диагностировании объект должен быть поставлен в такие условия, когда любой дефект, вызывающий рассматриваемые множества неисправностей, порождает ошибку. Если при диагностировании ставится задача определения места и вида дефекта, то объект должен быть поставлен в такие условия, при которых дефект обязательно порождает одну или множество ошибок, отличных от ошибок других дефектов.

Первоочередной целью технического диагностирования является проверка работоспособности или исправности. Число различаемых технических состояний при этом равно двум — работоспособное и неработоспособное (исправное и неисправное). Если установлено, что объект неработоспособен или неисправен, то начинается поиск дефектов, целью которого является определение местонахождения и, при необходимости, причины и вида дефекта. Число состояний, которые необходимо различить в результате поиска, определяется глубиной поиска дефекта и требуемой достоверностью результатов диагностирования. Глубина поиска задается указанием части объекта с точностью, до которой определяется место дефектов [5]. Например, для средств вычислительной техники глубина поиска может быть задана с точностью до электронного блока, модуля или заменяемого элемента.

Достоверность результатов диагностирования определяется степенью их соответствия истинному техническому состоянию. Количественной характеристикой достоверности служит вероятность совпадения.

Совокупность средств диагностирования, правил его проведения, установленных соответствующей документацией, образует систему технического диагностирования.

Требования к системе диагностирования зависят от того, на каком этапе (проектирование, эксплуатация, обслуживание, ремонт) она используется.

Задача диагностирования объекта на этапе разработки — определить соответствие функционирования создаваемого объекта техническому заданию. Способом диагностирования является построение математических моделей проектируемого ТО и изучение их поведения в различных режимах и при учете разброса параметров составных частей и условий эксплуатации. Для целей диагностирования на этапе разработки сложных ТО также широко применяют имитационное моделирование.

На этапе производства диагностирование является неотъемлемой частью общего технологического процесса и характеризуется большой глубиной диагноза. Например, смонтированные печатные платы после изготовления детально

контролируются, при выявлении отказа они диагностируются с целью замены дефектного элемента и возвращения в производственный цикл [2]. Требуемая глубина поиска дефекта в этом случае — до заменяемого элемента.

Требования к системам диагностирования, предназначенным для этапа эксплуатации, могут варьироваться в широких пределах в зависимости от условий эксплуатации, требуемой продолжительности, периодичности проверок, достоверности результатов и глубины поиска дефекта.

В общем случае процесс диагностирования ТО представляет собой процедуру подачи на объект последовательности входных проверочных воздействий (тестовых сигналов), получения ответных выходных сигналов (реакций) и последующего анализа ответных реакций на тестовые сигналы. В качестве проверочных могут использоваться рабочие входные сигналы или последовательность специально генерируемых тестовых воздействий. В первом случае принято говорить о функциональном, а во втором — о тестовом диагностировании.

Системы функционального диагностирования позволяют диагностировать объект в процессе выполнения им рабочих функций и определять отказ в момент его возникновения, но совокупность и последовательность входных воздействий в таких системах ограничены, поскольку заданы рабочим алгоритмом и не могут выбираться произвольно. Системы функционального диагностирования, применяемые в процессе эксплуатации ТО, позволяют реагировать на нарушения в работе объекта в режиме реального времени, подключать резервные узлы взамен неисправных, переходить на другие режимы работы, для которых возникшая неисправность незначительна, то есть строить адаптивные системы.

В системах тестового диагностирования проверочные воздействия вырабатываются диагностирующим устройством. Поэтому как состав, так и последовательность их подачи можно задавать исходя из условий эффективной организации процесса диагностирования. При тестовом диагностировании для подачи проверочных воздействий и получения реакции можно использовать не только входы и выходы объекта, но и вспомогательные внутренние контрольные точки, выбирать очередное воздействие в зависимости от результатов предыдущих проверок [5]. Тестовое

диагностирование ТО является более гибким и, как правило, более эффективным при большой глубине поиска дефекта.

Процесс тестового диагностирования состоит из отдельных частей, каждая характеризуется подаваемым на объект тестовым воздействием и считываемой с объекта реакцией. Такие части называются элементарными проверками или тестами. Алгоритм диагностирования представляет собой последовательность тестов и анализа их результатов [2]. Диагностирование можно рассматривать как специфический процесс управления, целью которого является определение технического состояния объекта.

На рисунке 3 приведена классификация алгоритмов диагностирования, включающая проверяющие и диагностирующие алгоритмы, различающиеся глубиной поиска дефектов [2]. Особенности организации алгоритмов функционального диагностирования позволяют использовать их в основном в тех случаях, когда требуется минимальная глубина поиска дефекта, то есть для проверки исправности и работоспособности. Основное назначение тестовых алгоритмов — локализация места возникновения дефекта, определение вида и причин его возникновения.

Как тестовые, так и функциональные проверки можно разделить на две группы: алгоритмические и параметрические. Алгоритмические тесты проверяют правильность функционирования объекта, корректность выполнения реализованных в ТО алгоритмов. Как правило, алгоритмическое диагностирование используется для обнаружения устойчивых сбоев и отказов чаще всего в цифровых устройствах.

Проверка правильности выполнения решаемых в ТО задач проводится как в реальном, так

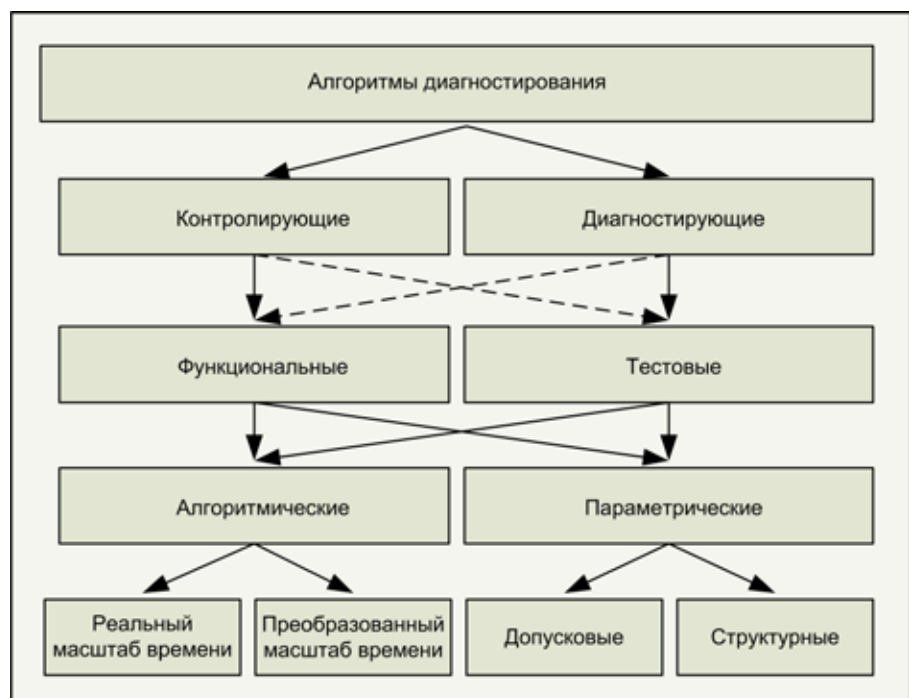


Рис. 3. Классификация алгоритмов диагностирования

и в преобразованном масштабе времени. Диагностику правильности выполнения алгоритмов в реальном масштабе времени можно выполнять путем функционального диагностирования. В ряде случаев удобна проверка в замедленном темпе подачи тестовых сигналов.

Параметрическое диагностирование дает ответы на следующие вопросы:

- соответствуют ли контролируемые параметры ТО расчетным или заданным значениям;
- соответствуют ли параметры составляющих частей ТО паспортным значениям.

При разработке алгоритмов диагностирования параметров важной задачей является получение информации, которая позволяет сравнительно легко определять и рассчитывать параметры составных частей ТО.

Один и тот же результат диагностирования — определение технического состояния объекта — может быть достигнут разными путями. Тесты могут отличаться затратами на реализацию, объемом получаемой информации и выполняться в разной последовательности. Таким образом, для решения одной и той же задачи можно построить несколько алгоритмов, различающихся между собой тестами и их последовательностью. Разработка алгоритма диагностирования прежде всего требует оценить, каков необходимый объем диагностической информации. Состав контролируемых параметров и объем диагностической информации должны быть достаточными для однозначного выявления принадлежности состояния ТО одному из непересекающихся подмножеств, каждое из которых соответствует той или иной неисправности, отвечающей заданной глубине поиска дефекта или исправному состоянию.

Определение состава и диагностирующей значимости контролируемых параметров сложных ТО в процессе синтеза СКД выделяют, как правило, в отдельную оптимизационную задачу, целью решения которой является минимизация

мощности множества контролируемых параметров ТО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного в работе анализа основ общей теории систем и технической диагностики обоснована необходимость применения данных теорий в качестве научной базы при решении проблемы синтеза систем контроля и диагностики сложных ТО. Создание эффективной СКД сложного ТО на современном уровне развития техники не возможно без знания теоретических основ анализа и синтеза сложных систем, являющихся предметом исследования ОТС. Изучение общих методов распознавания и математической теории технической диагностики в свою очередь дает возможность обоснованного выбора конкретных способов диагностики и соответствующих им алгоритмов и правил решения при практической реализации СКД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гузик В. Ф. Статистическая диагностика неравновесных объектов / В. Ф. Гузик, В. И. Кидалов, А. П. Самойленко. — СПб. : Судостроение, 2009. — 304 с.
2. Васильев В. И. Электронные промышленные устройства / В. И. Васильев. — М. : МАИ, 1998. — 320 с.
3. Основы общей теории систем. Ч. 1 / А. А. Попов [и др.] — СПб. : ВАС, 1992. — 248 с.
4. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. — М. : Машиностроение, 1978.— 240 с.
5. Сафарбаков А. М. Основы технической диагностики: учеб. пособие / А. М. Сафарбаков, А. В. Лукьянов, С. В. Пахомов. — Иркутск : ИРГУПС, 2006. — 216 с.
6. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 2002.