

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. Н. Е. Жуковского

”Харьковский авиационный институт”

А.С.Кулик

**СИГНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ
ДИАГНОСТИРОВАНИЕ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

“Бизнес Информ”
Харьков 2000

Рецензенты:

Я. Е. Айзенберг, д-р техн. наук, проф., генеральный конструктор корпорации "Хартрон"

В. М. Свищ, д-р техн. наук, проф., главный конструктор ПО "Коммунар"

Утверждено на заседании ученого совета Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", протокол № 5 от 27.01.99 г.

К 90 Кулик А. С. **Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления.** – Харьков: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

ISBN 966-7080-99-4

Рассмотрены особенности сигнально-параметрического подхода к разработке математического обеспечения компьютерного диагностирования систем управления. Изложены методы построения диагностических моделей и критерии оценки их структурных и сигнальных свойств. Описаны способы построения алгоритмов обнаружения видов отказов, поиска места их возникновения, установления класса отказа и определения вида отказа.

Для специалистов в области диагностирования систем управления техническими объектами, а также для докторантов, аспирантов, магистров и студентов соответствующих специальностей.

ББК 32.965

К 90 Кулік А.С. **Сигнально-параметричне діагностування систем управління.** – Харків: Держ. аерокосмічний ун-т «ХАІ»; Бізнес Інформ, 2000. – 260 с.

ISBN 966-7080-99-4

Розглянуто особливості сигнально-параметричного підходу до розробки математичного забезпечення комп'ютерного діагностування систем управління. Викладено методи побудови діагностичних моделей та критерії оцінки їхніх структурних та сигнальних властивостей. Описано способи побудови алгоритмів виявлення видів відмов, пошуку місця їх виникнення, встановлення класу відмови та визначення виду відмови.

Для спеціалістів у галузі діагностування систем управління технічними об'єктами, а також для докторантів, аспірантів, магістрів та студентів відповідних спеціальностей.

ББК 32.965

ISBN 966-7080-99-4

© А. С. Кулик, 2000

© Государственный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2000

© Бизнес Информ, 2000

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прогресс в совершенствовании функциональных возможностей техники неизбежно связан с повышением актуальности задач обеспечения ее надежности, живучести и безопасности. Из-за низкой надежности некоторых видов техники ежегодные затраты на техническое обслуживание и ремонт непрерывно растут. По доступным данным, к примеру, ремонтом и техническим обслуживанием металлорежущих станков в СССР занималось вчетверо больше рабочих, чем изготовлением этого оборудования [8]. Затраты средств на различного рода ремонты любого самолета составляют примерно трех-, четырехкратную стоимость по отношению к первоначальной. По данным ВВС США [136], общие затраты на ремонт и техническое обслуживание составили в 1960 г. 30% общих расходов на закупку и эксплуатацию, а в 1980 г. эти затраты возросли до 70%. Стоимость заводского ремонта авиационной техники в 1987 г. составила 15 млрд. дол., что в 2 раза больше, чем в 1980 г. Из-за низкой надежности авиационной техники ВВС вынуждены иметь дополнительное вспомогательное оборудование, стоимость которого составляет 75% стоимости всего вспомогательного оборудования.

Тенденция роста убытков, связанных с отказами техники, наблюдается во всех развитых капиталистических странах. Особенно уязвимыми отраслями являются машиностроение, самолетостроение, ракетостроение, ядерная энергетика и транспорт. Недостаточная надежность отдельных комплектующих элементов и узлов приводит в ответственных технических объектах к невосполнимым экономическим, социальным и экологическим потерям. Доказательство тому – катастрофы последних лет, имевшие место при космических полетах, на транспорте, в атомной энергетике.

В настоящее время интенсивное развитие получает ряд научно-технических направлений, нацеленных на дальнейшее повышение надежности, обеспечения безопасности, совершенствование эксплуатации производимых

изделий, как гражданских, так и военных, на основе широкого использования компьютерных систем. К числу таких направлений относятся: а) создание комплексных систем испытаний и контроля на всех этапах жизненного цикла изделий (разработка, производство и эксплуатация); б) создание новой технологической системы эксплуатации изделий по их текущему техническому состоянию; в) построение для ответственных объектов в авиации и космонавтике, на транспорте, в энергетике и в химических производствах систем автоматического управления, обеспечивающих требуемый уровень безопасности и живучести в условиях появления различных неисправностей, отказов и дестабилизирующих факторов; г) создание автоматизированных систем оперативной обработки телеметрической информации с подвижных или удаленных объектов для контроля выполняемых ими функций и принятия решения по дальнейшему их использованию; д) совершенствование эксплуатационных качеств изделий в целях повышения их безотказности и снижения трудоемкости технического обслуживания и ремонта. Развитие этих направлений обусловило появление проблематики совершенствования моделей, методов и средств восстановления по результатам косвенных измерений информации о характеристиках текущего технического состояния изделий и, в частности, появление проблемы создания систем компьютерного диагностирования динамических объектов.

Математическим моделям и методам диагностирования динамических объектов посвящены работы отечественных ученых А.Л. Горелика, П.С. Давыдова, Б.И. Доценко, С.П. Ксенза, Л.А. Мироновского, А.В. Мозгалева, П.П. Пархоменко, Е.С. Согомоняна, А.С. Сердакова, Д.Ф. Симбирского, И.М. Синдеева, Р.М. Юсупова и др., а также зарубежных I. Bandler, M. Basseville, R. Beard, R. Isermann, P. Frank, P. Clark, R. Caeks, A. Willsky, A. Salame и др. Разработка принципов, методов и средств автоматизации диагностирования нашла наибольшее отражение в трудах Н.П. Байды, В.А. Игнатова, В.П. Калявина, И.В. Кузьмина, Ю.В. Малышенко, а также в исследованиях G. Geiger, D. Towill, R. Chien и др.

Существующие системы диагностирования различных изделий, относящихся к классу динамических объектов, несмотря на различия, связанные с физикой протекающих процессов, с применяемыми методами получения, регистрации и преобразования информации, представляют собой сложные информационно-вычислительные комплексы обработки сигналов в целях получения достоверного диагноза. Эффективное использование и дальнейшее совершенствование таких комплексов сопряжено с существенными трудностями. Это обусловлено, во-первых, отсутствием систематизированных исследований в области теории и практики построения математических моделей, адекватно отражающих возможные аварийные состояния динамических объектов, т.е. диагностических моделей как нового класса моделей, описывающих связь соответствующих характеристик отказов с доступными измерениям сигналами. Во-вторых, известные подходы и методы диагностирования динамических объектов не позволяют аналитическим путем на единой методологической основе разрабатывать эффективное комплексное диагностическое обеспечение, дающее возможность с предельно осуществимой глубиной, оперативностью и достоверностью устанавливать факт наличия отказов, их место, класс и вид. В-третьих, создание программных средств диагностирования сопряжено с большими технико-экономическими затратами из-за отсутствия конструктивных машино-ориентированных моделей процесса диагностирования динамических объектов.

Разработке диагностических моделей посвящена обширная литература, где в качестве прямых признаков отказов применяются параметры, отражающие характеристики факта наличия отказов и их мест возникновения. Использование таких прямых признаков отказов и соответствующих им диагностических моделей не позволяет отражать более глубокие истинные причины появления аварийных состояний, а следовательно, и разрабатывать на этой основе совершенное диагностическое обеспечение. Трудности разработки диагностических моделей динамических объектов связаны с изменяющимся характером

протекающих процессов, нелинейностью свойств и характеристик, отсутствием конструктивных моделей отказов в цифровых, дискретных объектах, "размытостью" сигналов и рядом других причин.

К настоящему времени в теории диагностирования динамических систем сформированы общие сигнальный и параметрический подходы к разработке математического обеспечения процесса поиска причин аварийной ситуации. Вместе с тем эти подходы не дают возможности аналитическим путем решать задачи поиска места, установления класса отказов и их вида, что связано с определением характеристик, отражающих требуемую глубину поиска причин отказов.

Используемые в практике разработки диагностического обеспечения принципы и модели диагностирования не позволяют в большинстве случаев для таких объектов, как системы управления (СУ) летательных аппаратов, транспортных средств, технологических процессов и других, создавать эффективное программное обеспечение, основанное на применении современных информационных технологий в построении экспертных и знаниеориентированных компьютерных систем диагностирования.

Адекватное отражение свойств СУ, подверженных отказам, в соответствующих диагностических моделях предоставит возможность аналитически разрабатывать эффективное математическое обеспечение для обнаружения отказов, поиска их места, установления класса и определения вида отказов, использовать полученное математическое обеспечение для создания соответствующих программных средств и успешно решать научно-технические задачи компьютерного диагностирования. Для достижения этих целей необходима разработка теоретических и прикладных основ построения диагностического обеспечения процесса компьютерного диагностирования систем управления техническими объектами.

Проведенные автором исследования позволили сформировать такие основы и представить их в монографии.

Первая глава посвящена анализу состояния проблемы диагностирования систем управления техническими объектами. Рассмотрены такие аспекты, как состояние, тенденции и задачи в области практического диагностирования систем управления. Представлены особенности систем управления как объектов диагностирования. Проанализировано состояние и выявлены тенденции разработки диагностических моделей систем. Приведен обзор и предложена систематизация известных методов диагностирования систем управления. Сформированы задачи исследования.

Во второй главе описана совокупность новых взаимосвязанных задач диагностирования СУ и представлена соответствующая им концепция построения диагностических моделей. Подробно рассмотрены методы построения диагностических функциональных моделей для "малых" и "больших" отказов систем управления таких классов, как линейные, с гладкими нелинейностями, с существенными нелинейностями. Изложены методы построения диагностических логических моделей и их канонических форм, качественно отражающих связь между косвенными и прямыми признаками отказов.

Принципиальным вопросом при разработке диагностического обеспечения СУ является создание условий диагностируемости, заключающихся в возможности определения технического состояния объекта диагностирования с заданной точностью по доступным измерению сигналам. Этому вопросу посвящена третья глава монографии. Здесь сформулированы, исходя из концепции диагностических моделей, базовые определения диагностируемости динамических систем, сформулированы и доказаны основные леммы и теоремы о диагностируемости систем в малом, определены условия диагностируемости систем в большом. Сформулирован и доказан ряд теорем, позволивших получить конструктивные критерии общей, структурной и сигнальной диагностируемости в малом для исследуемых в работе классов динамических систем. Определены пути обеспечения полной диагностируемости динамических систем.

В четвертой главе изложены методы решения таких основных задач диагностирования СУ, как обнаружение отказов, поиск места их возникновения, установление класса отказа и определение его вида. Описана структура систематизированного использования разработанных методов для формирования эффективного математического обеспечения процесса диагностирования СУ.

Предложен способ организации алгоритмов диагностирования СУ, приводящий к древовидной схеме, служащей основой для применения современных технологий разработки и отладки программного обеспечения процесса диагностирования.

Настоящее издание адресовано научным сотрудникам, докторантам, аспирантам и магистрам, "неравнодушным" к проблеме решения практических обратных задач, какой является, в частности, задача диагностирования. Книга может быть полезна разработчикам диагностического обеспечения систем управления.

Проведенные исследования, полученные результаты, написание и издание книги были бы невозможны без доброго участия и помощи тех, кто ввел автора в рассматриваемую область, способствовал эффективной работе, и тех, кто помог книге стать реальностью.

Интерес к диагностированию систем управления восходит к годам студенчества на радиотехническом факультете Харьковского авиационного института. Профессор В.Л. Грецов ввел меня в область технической диагностики. Во время аспирантуры профессор Ю.Н. Соколов приобщил меня к новым идеям и инструментальным средствам диагностирования, а профессор В.Г. Рубанов – к совершенным технологиям и тайнам научно-исследовательской деятельности. Их деятельное участие в моем профессиональном становлении заслужило искреннюю признательность на долгие годы. С тех пор мне довелось работать со многими учеными, специалистами и коллегами, оказавшими помощь в кристаллизации моих представлений, а также в значительном расширении знаний и умений. И я безмерно благодарен за это П.П. Пархоменко, А.А. Красовскому,

Я.З. Цыпкину, А.В. Мозгалеvскому, Л.А. Мироновскому, Г.К. Москатову, В.Ю.Рутковскому, Я.Е. Айзенбергу, Р. Изерману, Е.К. Корнаушенко, А.В. Латышеву, И.Б. Сиродже, Б.И. Доценко, О.Н. Фоменко, А.П. Козию, Н.П. Отрадной, И.А. Булгакову, В.В. Нарожному, Н.Л. Процко.

Многие из представленных в книге методов, теоретических выкладок и экспериментальных результатов были получены в ходе научно-исследовательских работ, финансируемых Государственным аэрокосмическим университетом "ХАИ".

Понимание и существенную поддержку при работе над книгой автор получил от ректора университета В.С. Кривцова и проректора Я.С. Карпова, за что бесконечно им признателен.

Большую помощь в оформлении рукописи оказали Н.Л. Процко и И.Э.Черноптан, а на завершающей стадии – Л.А. Кузьменко, и автор глубоко ценит затраченные ими усилия.

При работе над рукописью были учтены замечания, сделанные рецензентами Я.Е. Айзенбергом и В.М. Свищом, которых автор сердечно благодарит.

А кроме того, я хочу поблагодарить мою жену Тому и сына Игорешу за их терпение, поддержку, одобрение и советы.

Анатолий Кулик
г.Харьков

ГЛАВА 1

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Возрастающее использование СУ техническими объектами во многих отраслях человеческой деятельности является закономерным следствием научно-технического прогресса современной цивилизации. Автоматизация только основных производственных видов работ приводит к существенному росту материально-технических затрат на поддержание работоспособности технических средств – СУ – на всех этапах их жизненного цикла. Отказы, неисправности, поломки, сбои, ошибки – это неизбежные факторы, дестабилизирующие процесс нормального функционирования систем управления. Оперативное, достоверное и эффективное выявление причин аварийного состояния СУ возможно с помощью научно обоснованных методов технической диагностики, наиболее полно учитывающих особенности объекта исследования. Разработка таких методов связана с решением ряда взаимосвязанных теоретических задач, представляющих собой в целом проблему данного исследования.

1.1. Состояние, тенденции и задачи в области практического диагностирования СУ

Диагностические системы представляют собой практическое воплощение диагностического обеспечения конкретного вида или класса СУ техническими объектами. Определяющими в характере и темпах развития диагностических систем являются особенности в прогрессе самого объекта диагностирования – СУ – следствия более общих закономерностей общественного производства.

Одно из основных направлений в развитии материальной культуры человечества обусловлено повышением производительности общественного труда в целях удовлетворения возрастающих потребностей людей. Для этого направления развития характерен ряд этапов. Первый этап – механизация –

связан с простейшим и исторически первым способом повышения эффективности труда. Использование орудий, механизмов, сложных машин с элементами механизации позволяет увеличить производительность труда по сравнению с ручными приемами работы. Однако такой рост ограничен физиологическими возможностями человека. Поэтому второй этап повышения производительности труда связан с автоматизацией, что означает исключение участия человека из конкретного производственного процесса путем передачи машине не только функций выполнения самой работы, но и операций по контролю за ходом технологии, диагностированию технического состояния элементов, поддержанию режима нормального функционирования машины. Примеров использования автоматов во многих производственных процессах предостаточно. Характерным для этого этапа есть обстоятельство, что автоматизировать можно только те работы и процессы, которые детально изучены, подробно и полно описаны с помощью соответствующих алгоритмических средств. Итак, автоматизация, являясь мощным способом повышения производительности труда, ограничена, в свою очередь, естественным пределом, обусловленным неизученностью многих явлений, процессов и невозможностью полной формализации практических действий. Основная идея преодоления предела этапа автоматизации состоит в использовании человеческой способности ориентироваться в незнакомых условиях и находить решение слабоформализованных задач, т.е. в использовании интеллекта. Поэтому третий этап повышения производительности труда назван кибернетизацией. Этот этап открывает широкие и более эффективные возможности, особенно на пути использования систем с искусственным интеллектом, знание-ориентированных и экспертных систем.

В соответствии с рассмотренными этапами происходило и происходит развитие СУ как средства увеличения производительности труда в различных производствах, авиации, на транспорте, в энергетике, а также средства

повышения боеготовности военной техники и эффективности ее использования в боевых условиях. Наиболее характерной тенденцией в развитии СУ является возрастание количества выполняемых функций при росте требований к качеству их исполнения, что приводит к устойчивому повышению конструктивной сложности и, как следствие, к значительному росту затрат на обслуживание СУ, связанное с контролем, диагностированием, ремонтом и восстановлением работоспособности, а также с ликвидацией последствий аварий и катастроф. К концу XX столетия эксплуатационные затраты на многие типичные для ведущих стран изделия стали соизмеримыми с затратами на их разработку и производство, а затраты на ремонт, восстановление и компенсации по некоторым видам техники – ощутимо сказываться на рентабельности их использования. Так, по ремонту оборудования в СССР было занято около четырех миллионов человек и более четверти всего парка металлорежущих станков. Ремонт и техническим обслуживанием станков занималось вчетверо больше рабочих, чем на изготовлении этого оборудования [8]. Согласно статистическим данным ФРГ, из года в год растут издержки компаний и фирм на эксплуатацию изделий. К примеру, только в 1982 году стоимость страховых платежей за отказавшие изделия повысилась на 1077 млн. немецких марок. При этом страховые платежи за среднюю и малую тяжесть отказов составили 2100 тыс. немецких марок, а выплаты за "тяжелые" отказы (катастрофические) – около 250 млн. немецких марок. Сумма выплат за ненадежную технику в машиностроении достигла в 1982 году 30% страховой суммы [137]. По данным печати США, общие затраты на ремонт и обслуживание радиотехнического оборудования составляют 1200% от его первоначальной стоимости. А ремонт и техническое обслуживание авиационного лайнера за время его эксплуатации в 3-4 раза превосходят его стоимость [26].

Как и для любого изделия, жизненный цикл СУ состоит из трех этапов. На каждом этапе возникают свои специфические задачи технического

диагностирования, уровень решения которых влияет на длительность жизненного цикла СУ, его стоимость и эффективность. Рассмотрим этапы жизненного цикла СУ с точки зрения практических задач диагностирования и уровня их решения на современном этапе научно-технического развития. Первый этап жизненного цикла связан с разработкой СУ. Современный подход к разработке СУ характеризуется тем, что в техническое задание кроме функциональных требований и характеристик вносятся требования по возможности диагностирования системы с заданной точностью, другими словами – по контролепригодности для всех этапов жизненного цикла. На всех последующих стадиях разработки (техническое предложение, эскизный, технический проекты, изготовление и испытание опытного образца) создается диагностическое обеспечение, которое используется в процессе разработки и на других этапах жизненного цикла СУ. Основная задача диагностического обеспечения на этапе разработки заключается в выявлении ошибок, недоработок, несовершенных решений, т.е. причин несоответствия спроектированной СУ требованиям технического задания. В практике проектирования современных СУ такая задача, как правило, решается на стадии стендовых испытаний опытного образца. На всех предыдущих стадиях разработки СУ обычно отсутствуют процедуры формального объективного диагностирования качества принимаемых решений, что приводит к накоплению проектных ошибок на всех стадиях, включая и стендовые испытания. На стендовых испытаниях в большей степени используются формальные методы диагностирования, реализуемые вручную или полуавтоматически, а также обычно применяются эвристические способы диагностирования, порожденные опытом и квалификацией профессиональных специалистов. Анализ состояния стендовых испытаний СУ [17,67, 95 131, 151] свидетельствует о следующем: 1) еще велик процент пропущенных при испытаниях ошибок, недоработок, "плохих" решений (~50%); 2) затрачиваются большие временные, материально-технические и профессиональные ресурсы

на организацию и проведение процесса испытаний; 3) значительное количество ошибок проекта выявляется только на стадии испытаний; 4) низок уровень автоматизации процессов диагностирования; 5) глубина диагностирования ограничивается сменным блоком.

Очевидно, что разработка СУ представляет собой важнейший этап, от качества выполнения которого зависят не только функциональные возможности спроектированной системы, но и эффективность ее эксплуатации, срок жизни, сервисность обслуживания и ряд других показателей и качественных оценок, характеризующих в целом качество изделия, требуемое современным производством и определяемое действующими отношениями. Поэтому создание совершенного диагностического обеспечения на этапе разработки является актуальной задачей на современном этапе развития СУ.

Второй этап жизненного цикла систем управления связан с их производством. На этом этапе СУ подвержены действию технологических нарушений и отклонений в производстве и монтаже, ошибок при выполнении технологических операций, использованию бракованных или не соответствующих проекту комплектующих элементов и ряду других дестабилизирующих факторов процесса производства. К примеру, 12...33% смонтированных печатных плат радиоэлектронной аппаратуры имеют неисправности [108]. При этом при проверке печатных узлов обнаруживаются такие дефекты: короткие замыкания проводников – 34...60%; обрывы проводников – 5...20%; пропущенные элементы – 5...10%; установленные элементы другого вида – 8...20%; неисправные элементы – 5...20%; прочие дефекты – 5...10%.

Выявление дефектов, неисправностей, отказов на этапе производства возможно только с помощью соответствующей технологии и средств контроля и диагностирования. В настоящее время затраты на поиск и устранение неисправностей на этапе производства составляют от 30 до 50% общих затрат на изготовление устройства. Эффективным средством повышения качества СУ

на этапе производства является использование соответствующих автоматизированных систем контроля (АСК). К настоящему времени в силу глубокой дифференциации и специализации предприятий сложилась такая практика, что предприятие-изготовитель отдельных комплектующих функциональных элементов и подсистем СУ использует для контроля качества соответствующие специализированные АСК. Примеры таких АСК описаны в литературе [1, 17, 82, 101, 116, 151].

Анализ функциональных возможностей известных АСК функциональных элементов, блоков и в целом СУ, а также исследование разрозненных и порой косвенных статистических данных о качестве диагностирования СУ на этапе производства свидетельствуют о наличии при изготовлении систем следующих нерешенных задач:

1. Совершенствование технологии и средств в целях повышения качества диагностирования.
2. Проведение контроля и диагностирования СУ в динамическом режиме функционирования с имитацией замкнутого контура.
3. Сокращение множества ручных операций в целях снижения сроков и стоимости диагностирования и повышения его достоверности.
4. Понижение требований к уровню квалификации персонала, проводящего диагностирование СУ.

Последний, третий, наиболее длительный этап жизненного цикла СУ – это эксплуатация. Эксплуатация СУ, как правило, начинается с пусконаладочных работ, во время которых выявляются накопленные в период транспортировки, хранения и установки отказы элементов и системы в целом. При этом используются соответствующие диагностические технологии и средства. Первый период эксплуатации СУ наиболее трудоемок с точки зрения затрат на наладку и обслуживание. В этот период проявляется большинство ошибок, недоработок и дефектов, не обнаруженных на этапах разработки и производства СУ. Косвенно это видно из статистических данных отказов,

зарегистрированных в серии космических полетов [4]. Наибольшее число отказов наблюдается в первые минуты полета. Интенсивность отказов убывает примерно в 10 раз за первые четыре часа полета. После этого происходит медленное ее изменение с выходом на установившееся состояние на 1...2-е сутки космического полета. Наиболее эффективное средство снижения затрат в этот период эксплуатации – это применение совершенных систем автоматического диагностирования.

Последующие периоды эксплуатации связаны в основном с появлением различного рода отказов, вызванных процессами деградации, старения, износа материалов, влиянием факторов среды, нарушением условий эксплуатации и целым рядом других причин. В большинстве случаев отказы СУ приводят к длительному простоя оборудования и изделий, в которых они используются, или к возникновению аварийной ситуации на подвижных объектах управления. Хотя можно привести достаточно примеров сокращения сроков простоя и трудоемкости обслуживания с помощью соответствующих средств технического диагностирования. Так, для ручного испытания военной типовой самолетной системы управления требовалось 25 часов, а использование автоматического испытательного оборудования позволило сократить контроль до десятков минут [151]. Новая цифровая система управления полетом для пассажирских самолетов А.300 и А.310 требует в несколько раз меньших затрат труда при техническом обслуживании, чем существовавшая ранее, за счет использования системы встроенного контроля, позволяющей обнаруживать и изолировать неисправные блоки с высокой эффективностью [95]. Анализ затрат времени, необходимого для ручного диагностирования электрооборудования, показывает, что вспомогательное время (время на подготовку) составляет 50-80% общих затрат на диагностирование. Например, при диагностировании электродвигателей вспомогательное время составляет 54%, основное – 31%, а время принятия решения – 15% общего времени диагностирования. Автоматизация позволяет значительно сократить время на

все составляющие процесса диагностирования электрооборудования [114]. Вместе с тем широкое использование различных технических средств диагностирования и, в частности, АСК не дает возможности решить все задачи по оценке технического состояния СУ и их функциональных элементов. Так, в гражданских авиационных системах [95] часть блоков не охвачена или охвачена не полностью контролем (3...5%), в результате чего увеличивается время поиска места отказа, и в конечном итоге задерживаются рейсы. Велико влияние отказов, возникающих в смежных системах, что приводит к неоправданному съему оборудования (47% от общего количества демонтированных блоков). Имеет место появление сложных отказов (двойных, перемежающихся и др.), из-за которых происходит основная масса задержки рейсов. Подобные отказы в аналого-цифровой системе И-11 составляют 17,9% от общего числа отказов. Отказы в самой системе контроля увеличивают время поиска и устранения отказов в несколько раз. Так, отказы блока контроля БВК-10 в АБСУ-154 приводят к увеличению трудоемкости устранения отказов в 2,5...3 раза и задержкам рейсов. Результаты анализа 665 случаев аномальных космических полетов показывают, что одной из основных причин появления аварийных ситуаций являются отказы бортовой аппаратуры [4]. Из статистических данных следует, что 58% нештатных ситуаций были вызваны конструкторскими недоработками, 19% – производственными, 10% – эксплуатационными, 8% – недоработками изготовления и контроля.

В ряде работ приводятся сравнительные оценки материально-технических затрат на устранение отказа, обнаруживаемого на разных этапах жизненного цикла систем. Эти затраты возрастают примерно в десять раз при сохранении необнаруженного отказа в системе, переходящей из одного этапа жизненного цикла в другой. В результате анализа состояния тенденций технического обслуживания СУ на этапе эксплуатации выявлены следующие характерные особенности:

1. Возрастающие материально-технические затраты на диагностирование

СУ существенно снижают рентабельность их использования.

2. Требуется непрерывный рост квалификации персонала для технического обслуживания поступающих в эксплуатацию новых СУ.

3. В ряде отраслей, применяющих СУ, имеет место низкая производительность труда обслуживающего персонала из-за использования эвристических приемов работы либо низкого уровня его механизации, или из-за применения несовершенной автоматизации.

4. Реализуемая в существующих автоматических средствах технического диагностирования глубина диагностирования не соответствует возможностям ЗИПа, что влечет за собой значительные затраты на восстановление работоспособности СУ.

5. В существующих автоматизированных и автоматических средствах технического диагностирования СУ предельно возможная глубина поиска места отказа ограничивается сменным блоком, функциональным элементом, что приводит для многих видов типовых отказов (дрейф нуля, изменение коэффициента передачи, переориентация датчика, переполусовка питания и др.) к неоправданному съему оборудования в целях восстановления его работоспособности.

6. Из-за несовершенных средств технического диагностирования, не соответствующих уровню функциональных возможностей, конструктивной сложности СУ, производительность общественного труда фактически снижается.

Проведенный для диагностирования СУ анализ состояния и тенденций как по "вертикали" (этапы повышения производительности труда), так и по "горизонтали" (этапы жизненного цикла) свидетельствует об отставании уровня развития средств технического диагностирования от уровня развития систем управления, что является существенной причиной низкой их рентабельности и эффективности во многих ведущих отраслях экономики развитых стран.

Исследование известных средств технического диагностирования, описанных в литературе [1, 17, 95, 101, 116, 131, 135, 151], а также знакомство с технологиями и средствами диагностирования СУ в авиастроении (АНТК им. О.К. Антонова, НИИ АС, НИИ ПФМ, КМЗ, "Авиаконтроль"), ракетостроении (ККБ "Луч", КБ "Южное" СКБ "Полисвет" ПО "Коммунар"), танкостроении (З-д им. Малышева), приборостроении (ХГПЗ им. Шевченко, НИИТИП, Курский приборостроительный З-д, ПО "Электроаппаратура") позволило выявить принципиальные недостатки. Во-первых, нет единых технических средств и технологий для диагностирования СУ на всех этапах его жизненного цикла. Во-вторых, частичная, а в ряде случаев – отсутствующая вообще автоматизация процессов диагностирования СУ. В-третьих, использование сложных, несовершенных и неунифицированных технических средств диагностирования, подготовка и эксплуатация которых связана с большими затратами. В-четвертых, диагностирование СУ производится в разомкнутом состоянии и в установившихся режимах функционирования. В-пятых, низкая глубина автоматического и автоматизированного диагностирования СУ, не соответствующая имеющимся возможностям по восстановлению работоспособности.

Принципиальной возможностью для устранения отмеченных недостатков в области практического диагностирования СУ является создание единой системы поддержания максимального качества СУ на всех этапах ее жизненного цикла. В такой системе автоматическое средство диагностирования необходимо для получения точной, достоверной и оперативной информации о техническом состоянии СУ в целях принятия эффективных мер по обеспечению высокого качества ее функционирования. В мировой практике имеются примеры такого подхода к обеспечению требуемого качества продукции. Так, известны японская система гарантии качества, а также системы обеспечения качества в навигационных комплексах и для ряда потребительских товаров [151] путем широкого использования

встроенных микропроцессорных контроллеров с развитым диагностическим обеспечением.

В результате изучения на внутреннем рынке спроса на системы автоматического диагностирования СУ и анализа необходимых при этом потребительских качеств установлены следующие предъявляемые к ним требования: 1) надежность функционирования; 2) достоверность диагноза; 3) оперативность получения результатов диагностирования; 4) глубина диагностирования, соответствующая имеющимся возможностям эффективного восстановления работоспособности СУ; 5) сервисность и простота в эксплуатации системы диагностирования; 6) приемлемая стоимость; 7) эффективность использования.

Большинство известных в практике диагностирования СУ систем и технических средств не отвечают в полной мере предъявляемым сегодня требованиям и, более того, не могут быть модифицированы до уровня требуемых потребительских качеств.

Наиболее перспективными направлениями практического использования диагностирования СУ являются следующие. Первое. Создание комплексных систем обеспечения качественного функционирования СУ на всех этапах жизненного цикла. Особенно это актуально применительно к авиации, транспорту, энергетике, где велика не только цена отказа, но и катастрофические последствия аварий. Второе. Формирование новой технологической системы эксплуатации СУ по их текущему техническому состоянию. Внедрение этой системы в практику эксплуатации СУ позволит значительно сократить расходы на обслуживание по сравнению с расходами на существующую систему планово-предупредительного обслуживания и ремонта. Третье. Построение для ответственных объектов, с высоким требуемым уровнем безопасности и живучести, отказоустойчивых систем управления, т.е. систем, способных активно парировать появление различного рода отказов, неисправностей, дестабилизирующих факторов [14, 35, 36, 71, 74,

85, 99, 141, 143, 144, 145]. Это, например, системы управления самолетом при боевых повреждениях или системы стабилизации автономного космического объекта с длительным сроком функционирования. Четвертое. Создание автоматизированных систем оперативной обработки телеметрической информации с подвижных или удаленных автоматических объектов в целях контроля выполняемых ими функций и принятия своевременного решения по предупреждению или локализации аварийной ситуации. Пятое. Подготовка и аттестация операторов, пилотов, космонавтов с помощью автоматизированных стендов, позволяющих имитировать возможные аварийные ситуации в соответствующих объектах управления и производить объективную оценку качества выполняемых при этом функций с анализом причин некавалифицированных действий.

Перейдем к рассмотрению СУ как объекта диагностирования.

1.2. Особенности СУ как объекта технического диагностирования

В технической диагностике объекты исследования традиционно квалифицировались по характеру сигналов – на дискретные и непрерывные. Такая классификация до недавнего времени определяла и два относительно независимых направления в развитии технической диагностики. В последние годы появился ряд практических проблем, которые не могли быть успешно решены в рамках только одного автономного направления. Поэтому начался процесс интеграции накопленных в непрерывной и дискретной технической диагностике арсеналов методов и средств в целях решения насущных проблем. Многие результаты успешных исследований свидетельствуют о появлении нового класса объектов технического диагностирования – гибридного (непрерывно-дискретного) – и о начале формирования соответствующего направления технической диагностики. СУ в зависимости от состава и принципа действия функциональных элементов могут быть отнесены к классу непрерывных или гибридных объектов технического диагностирования.

Рассмотрим укрупненно структуру типовой СУ, реализующей управление по отклонению. При этом исключим из рассмотрения системы энергоснабжения, коммутационные устройства и другие вспомогательные элементы, обеспечивающие функционирование основных составляющих замкнутого контура. На рис.1.1 представлена обобщенная функциональная схема СУ, состоящая из управляемого технического объекта и автоматического управляющего устройства, соединенных в замкнутый контур.



Рис. 1.1. Обобщенная функциональная схема СУ

На объект управления оказывают влияние различные внешние воздействия, обозначенные вектором $f_1(t)$, а также внутренние, обуславливающие появление отказов из заданного подмножества D_1 . Управляющее устройство подвержено влиянию внешних воздействий $f_2(t)$ и отказов подмножества D_2 , а также управляющего воздействия $u(t)$. Множество всех отказов, действующих на СУ, состоит из описанных подмножеств $D = D_1 \cup D_2$.

Конкретизируем представленную схему путем раскрытия структуры управляющего устройства.

На рис.1.2 изображена функциональная схема типовой непрерывной СУ.

В этой схеме выделены такие функциональные элементы, как датчики, регулятор и сервоприводы. С помощью датчиков формируются, как правило, электрические сигналы о текущем состоянии объекта, представляющие собой вектор измерений $y(t)$.

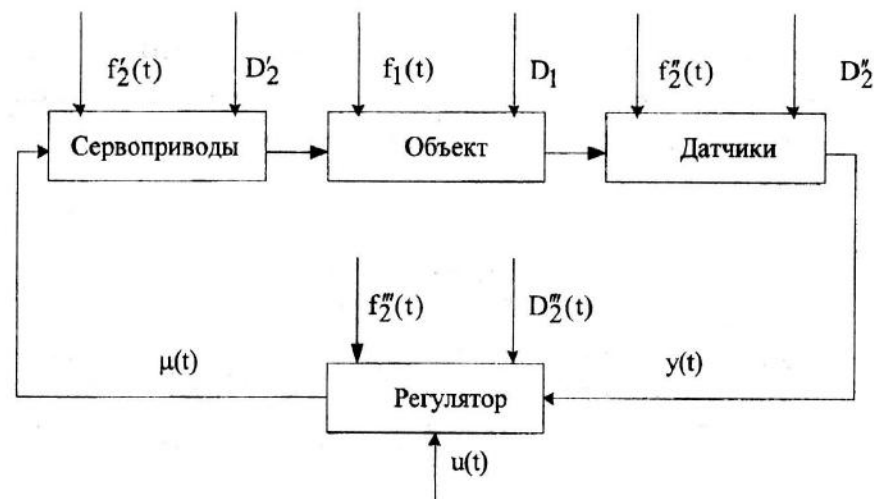


Рис. 1.2. Функциональная схема типовой непрерывной СУ

Регулятор на основании вектора измерений и вектора управляющих воздействий $u(t)$ по соответствующим алгоритмам управления формирует вектор сигналов управления $\mu(t)$ на сервоприводы. Сервоприводы вырабатывают определенные физические воздействия на объект, изменяя тем самым его состояние в соответствии с управляющим воздействием $u(t)$. На все описанные функциональные элементы действуют соответствующие внешние воздействия и характерные отказы. Так, внешними возмущениями $f'_2(t)$ для датчиков могут быть различные помехи, шумы и ошибки, влияющие на точность измерений. Объединение всех подмножеств отказов представляет собой подмножество отказов управляющего устройства, т.е. $D_2 = D'_2 \cup D''_2$.

В современных и особенно перспективных разрабатываемых СУ

регулятор реализуется на базе управляющей цифровой вычислительной машины (УЦВМ), которая для подвижных объектов управления называется бортовой цифровой вычислительной машиной (БЦВМ). СУ, содержащая в контуре управления УЦВМ, представляет собой цифровую систему управления [25, 46]. Функциональная схема такой типовой системы изображена на рис.1.3.

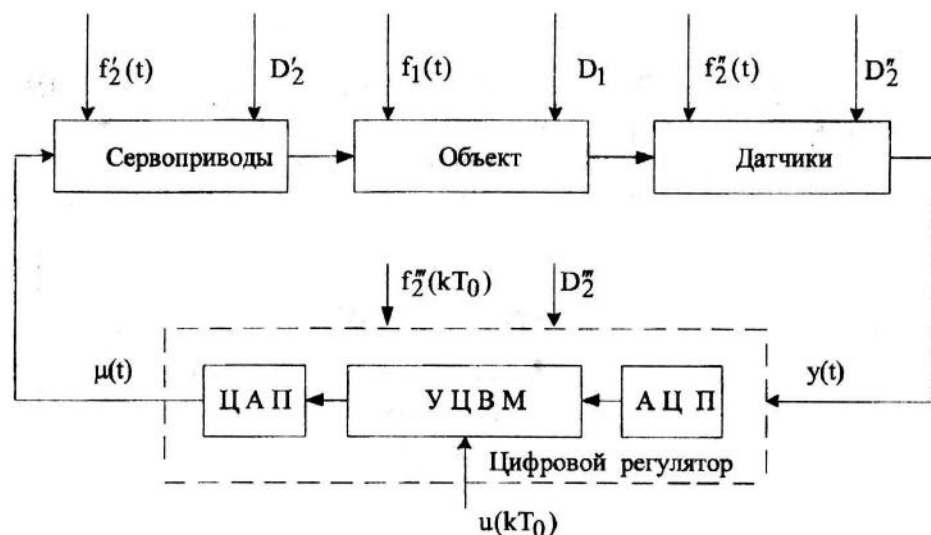


Рис. 1.3. Функциональная схема типовой цифровой СУ

Цифровой регулятор состоит из УЦВМ и аппаратного интерфейса, включающего в себя АЦП – аналого-цифровой преобразователь и ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь. Цифровая СУ отрабатывает управляющее воздействие $u(kT_0)$, являющееся функцией дискретных значений аргумента, где $k = 0, 1, 2, \dots$; T_0 – период квантования. На цифровой регулятор поступает вектор непрерывных сигналов $y(t)$, и в результате соответствующих преобразований формируется вектор непрерывных управляющих сигналов $\mu(t)$ на сервоприводы, которые вырабатывают воздействия на объект, изменяющие его состояние в соответствии с законом управления. На качество функционирования каждого элемента цифровой СУ оказывают влияние определенные внешние воздействия и отказы.

Рассмотрим особенности СУ, характеризующие ее как специфический объект диагностирования. Прежде всего СУ состоит из разнородных функциональных элементов, основанных на различных принципах действия и использующих различные виды энергии (электрической, пневматической, гидравлической и др.). Каждый из функциональных элементов – это конструктивно законченное устройство, состоящее из сотен и тысяч компонент, участвующих в его функционировании. При этом дефект, неисправность каждой компоненты может быть источником отказа. Поэтому СУ представляет собой сложную, состоящую из разнородных компонент систему, при работе которой, даже если она собрана из надежных функциональных компонент, вероятность появления отказов становится значительной.

СУ имеет динамическую реакцию на воздействия, т.е. она не отвечает немедленно на любое управляющее, внешнее или внутреннее воздействие. Более точно, динамическим является такое поведение системы, когда ее текущее состояние, а также характер изменения этого состояния определяются не только внешними факторами, действующими на систему в каждый данный момент времени, но и внутренними факторами различной природы, возникающими благодаря последствию и обусловленными предшествующими состояниями на интервале времени, который характеризуется внутренней памятью.

Следующая особенность связана с замкнутостью контура передачи и преобразования сигналов в СУ. Это приводит к тому, что отказ одного элемента влияет на характер и режимы функционирования других, что вызывает изменение характера сигналов во всех точках системы. Например, в одноконтурной системе стабилизации угловой скорости электродвигателя постоянного тока полный отказ тахогенератора – датчика обратной связи – приводит к существенному ухудшению статических и динамических свойств системы, так как при таком отказе она функционирует как разомкнутая [18].

Замкнутая СУ обладает способностью частично компенсировать влияние небольших, неполных отказов элементов на выходные сигналы системы, т.е. "скрывать" факт появления таких отказов. В этом проявляется стабилизирующее и компенсирующее свойство отрицательной обратной связи.

Для осуществления диагностирования СУ с заданной глубиной требуется выведение соответствующего числа контрольных точек. В контрольных точках информативность сигналов относительно требуемой точности диагностирования различная и зависит от используемых сигнатур: переходных, частотных, статических характеристик, коэффициентов математических моделей и других обобщенных характеристик диагностируемой системы. Более того, для обеспечения диагностируемости системы в ряде случаев возникает необходимость измерения таких сигналов, преобразование которых принципиально невозможно или практически нецелесообразно. Следует отметить также, что увеличение числа контрольных точек в СУ приводит к усложнению системы связи, а также к усилению влияния процесса диагностирования на качество функционирования объекта и на его технический диагноз.

Одной из особенностей СУ, существенно влияющих на возможности ее диагностирования, является нелинейный характер зависимости выходных сигналов системы от характеристик отказов. Если, например, величина параметра, характеризующего отказ, изменяется в несколько раз, то значение выходного сигнала в то же число раз не изменяется, т.е. связь между выходными сигналами системы и параметрами отказов нелинейна, хотя при этом сама СУ может быть линейной на рабочем участке. Для СУ характерен широкий спектр физических отказов, который изучен и исследован недостаточно полно. Поэтому в настоящее время отсутствуют хорошие модели отказов элементов СУ типа моделей выявления отказов по константному "0" и по константной "1", широко используемых при контроле цифровых схем.

На разработку диагностического обеспечения СУ в значительной степени

влияет "размытость" сигналов, т.е. неопределенная природа поведения системы. Неопределенность в динамике СУ при отсутствии отказов обусловлена следующими причинами. Первая. Неизбежное наличие различного рода шумов, ошибок измерений, неточностей моделирования приводит к тому, что в СУ отношение сигнал/помеха принимает малые значения. Вторая. Процессы старения, дрейфа и деградации в компонентах вызывают отклонения от номинальной реакции СУ в течение всего периода ее жизненного цикла. Третья. Конечность производственных допусков на компоненты и элементы приводит к отличию реакции одного образца СУ от реакции другого. Все эти причины вызывают разброс в поведении сигналов относительно некоторого желаемого расчетного их характера. Это обстоятельство существенно затрудняет решение задачи обоснованного назначения допусков на контролируемые признаки характеристики и сигнатуры, что приводит к низкой достоверности диагностирования и малой глубине поиска места отказа.

Принципиальной особенностью СУ является нелинейность статических характеристик функциональных элементов. Причем характеристики могут быть с гладкими нелинейностями, которые поддаются обычной линеаризации в рабочем диапазоне сигналов, а также с существенными нелинейностями, для которых может быть получена линейная аппроксимация с помощью метода гармонической линеаризации. Широкое использование в СУ релейных и дискретных функциональных элементов приводит к существенному усложнению характера протекающих процессов при возникновении различных отказов. Следует отметить, что отдельные отказы изменяют не только вид статической характеристики, но и ее класс. Так, вместо линейной на рабочем участке характеристики в результате отказа может появиться существенно нелинейная зависимость между выходным и входным сигналами [67, 68].

Широкий спектр физических отказов в СУ порождает соответствующие их потоки на различных этапах жизненного цикла. Наиболее плотные потоки отказов наблюдаются на этапах разработки, производства и на начальной

стадии этапа эксплуатации. Математического описания или количественных характеристик таких потоков отказов в литературе для конкретных систем управления нет. Для отдельных радиоэлектронных блоков [108], космических кораблей [4] имеющиеся данные свидетельствуют о многократности отказов на этих этапах, в основном независимости появления отказов, а также о нестационарности потока отказов. Последующие стадии этапа эксплуатации СУ характеризуются установлением простейшего пуассоновского потока отказов [4, 6], признаками которого являются ординарность, отсутствие последствия и стационарность. Модель простейшего потока отказов наиболее часто используется при разработке диагностического обеспечения различных объектов. Анализ статистических данных по отказам отдельных функциональных элементов и систем в целом свидетельствует о том, что применительно к конкретной СУ для формирования рабочих гипотез о характеристиках потоков отказов наиболее часто используются λ -характеристики компонент и элементов, на основании которых вычисляются соответствующие вероятности появления отказов. Вместе с тем в большинстве практических разработок распространено предположение о равновероятности появления отказов в СУ. Более общий подход заключается в рассмотрении отказа в системе как неопределенного события. Неопределенность обусловлена неизвестными моментом времени, местом появления отказа, а также непредвиденными видами отказа: обрыв, короткое замыкание, частичный, полный отказы и т.п.

Обыкновенные СУ [31, 99] представляют собой достаточно изученный класс систем, которые в номинальном режиме функционирования (т.е. при отсутствии отказов) описываются адекватными и конструктивными математическими моделями реально протекающих процессов. Наиболее распространенными моделями являются модели, описываемые в классах линейных дифференциальных обыкновенных уравнений с постоянными коэффициентами, операторных моделей в форме передаточных функций,

нелинейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, нелинейных алгебраических уравнений, а также в классах аналогичных уравнений с дискретными аргументами. Такие модели отражают специфику СУ с информационной точки зрения. Появление любого отказа из заданного множества D изменяет в СУ характер протекающих физических процессов. Исследование и изучение таких аварийных процессов позволяет строить соответствующие математические модели, связывающие причину (характеристики, признаки отказа) со следствием (признаками отклонения доступных измерению сигналов). Такие модели представляют собой наиболее эффективное формальное средство описания существенных особенностей объекта диагностирования с точки зрения решаемой задачи. Сложность динамических процессов, протекающих в СУ при появлении отказов, является основной причиной малой изученности аварийных режимов и полного или частичного отсутствия информационных и конструктивных математических моделей для решения актуальных задач диагностирования [55, 64].

Рассмотренные особенности СУ как объекта диагностирования раскрывают более глубокие специфические свойства системы при возникновении в ней отказов, по сравнению с известными в литературе результатами подобных исследований. Учет таких особенностей СУ, как сложность и разнородность, динамичность, замкнутость контура, неоднородная информативность выходных сигналов, широкий спектр отказов, нелинейность зависимостей, "размытость" сигналов, неопределенность характеристик отказа дает возможность более полно отразить существенные стороны объекта диагностирования и построить адекватные насущным задачам математические модели. Построение таких моделей будет означать достижение следующей ступени в познании аварийных процессов СУ. Эти новые знания позволят создавать более эффективные автоматические системы технического диагностирования, использование которых значительно повысит надежность, безопасность и живучесть машин, станков, самолетов, космических объектов,

транспортных средств, ядерных установок и других гражданских и военных изделий, качество функционирования которых существенно зависит от текущего технического состояния применяемых систем управления.

1.3. Диагностические модели СУ: состояние и тенденции

Рассмотрим общие теоретические положения о моделях вообще как средстве, инструменте познания. Это позволит сформировать теоретическую платформу для качественного анализа состояния и тенденций в области построения таких специфических моделей, которыми являются диагностические модели.

Построение моделей идеальных или материальных, как отмечали А. Розенблют и Н. Винер [147], "по необходимости занимает центральное место в процедуре любого научного исследования". Это обусловлено тем, что "модели выступают в качестве необходимого промежуточного звена между совокупностью утверждений теории и действительностью, которая приблизительно отражается в соответствующих моделях" [126]. Существует несколько определений модели в научной литературе, посвященной философским аспектам моделирования [7, 93, 126]. Наиболее близким определением для прикладных областей является определение, данное Я.Г.Неуйминым [94]: "Модель в общем смысле (обобщенная модель) есть создаваемый с целью получения и (или) хранения информации специфический объект (в форме мысленного образа, описания знаковыми средствами либо материальной системы), отражающий свойства, характеристики и связи объекта-оригинала произвольной природы, существенные для задачи, решаемой субъектом".

Из приведенного определения вытекают общие свойства моделей, которые используются при практическом моделировании:

1. Модель создается в результате взаимодействия таких компонент: субъекта, задачи, решаемой субъектом, объекта-оригинала и средства

реализации модели. Особую роль при этом играет решаемая задача, которая не только позволяет произвести целенаправленный отбор существенных признаков и характеристик исследуемого объекта, но и способствует интеграции результатов отбора в единый целостный образ, т.е. играет роль главного системообразующего фактора. Следовательно, вне контекста задачи понятие модели лишено смысла.

2. Для каждого материального объекта может быть построено бесчисленное множество в равной степени адекватных моделей, но отличающихся существом, зависящим от рассматриваемой задачи.

3. Одной и той же задаче соответствует множество моделей, информационно эквивалентных, но различающихся формами представления. Некоторая СУ, например, может быть описана в вербальной (словесной) форме, представлена таблицей данных или графиками, описана аналитическими выражениями или алгоритмами, воспроизведена на аналоговой моделирующей установке или на ЦВМ. Выбор формы модели определяется только удобством и эффективностью ее последующего использования для решения задачи.

4. Модель отражает только существенные с точки зрения решаемой задачи свойства, характеристики и связи объекта, поэтому является лишь относительным, приближенным подобием его, принципиально бедным в информационном отношении. Это фундаментальное свойство модели.

5. При создании модели используются ограничения и допущения, которые формируются исходя из условия и требования решаемой задачи. Ограничения позволяют установить границы исследуемых свойств объекта. Допущения характеризуют приемлемую в рамках решаемой задачи степень идеализации свойств объекта, фиксируют факторы, которые можно считать несущественными. Ограничения и допущения являются органической составной частью модели.

6. Если в качестве объекта-оригинала используется модель, созданная

ранее и практически достоверная, то создание вторичных, а в общем случае n -кратных моделей может осуществляться с помощью теоретических методов, при этом во вторичную и все последующие производные модели автоматически входят ограничения и допущения, содержащиеся в исходной и промежуточных моделях.

7. Модель по сути есть информационное образование, которое может быть представлено, в принципе, в трех информационно-равноценных формах: концептуальной (мысленной), знаковой и материальной.

Итак, определены общие свойства моделей. С позиций этих свойств перейдем к анализу диагностических моделей. При этом будем рассматривать не конкретные системы управления, а группу СУ, наиболее изучаемую и исследуемую с точки зрения диагностирования и описываемую в номинальном режиме в классе линейных, стационарных динамических систем. Сформулируем в наиболее общей форме постановку задачи диагностирования СУ. Заданы: 1) система автоматического управления, которая в номинальном режиме описывается в классе линейных стационарных динамических систем; 2) множество видов физических отказов с характеристикой их потока; 3) множество допустимых контрольных точек; 4) множество допустимых тестовых и рабочих сигналов управления; 5) время диагностирования системы. Требуется произвести техническое диагностирование СУ в целях контроля технического состояния (обнаружения отказов), поиска места и определения причин отказа.

Для решения этой задачи с помощью имеющихся в распоряжении эффективных и конструктивных методов необходимо существенные особенности объекта диагностирования представить с помощью соответствующих удобных форм моделей. В этих моделях должны быть формально связаны посредством определенных средств признаки, причины и следствия для конкретных аварийных режимов функционирования СУ, вызванных видами отказов из заданного множества. Для начала модели,

связывающие признаки отказов с признаками реакции на них объекта, будем называть диагностическими моделями.

Проанализировать все множество существующих диагностических моделей СУ с точки зрения построения полной и выдержанной их классификации не представляется возможным по ряду причин. Создание диагностических моделей – это развивающаяся область знаний. Поэтому сформировать конструктивные и полезные для практической работы признаки классификации затруднительно, тем более что известное множество моделей не всегда удовлетворяет общим свойствам моделей и признакам диагностических моделей. Такое состояние является характерным для развивающихся областей знаний, в которых происходит движение от незнания к знанию или от проблемы закрытого, черного ящика к проблеме открытого, белого ящика. "Все научные проблемы начинаются как проблемы закрытого ящика, т.е. проблемы, в которых известно лишь небольшое число значимых переменных. Движение науки и состоит в прогрессирующем раскрытии этих ящиков" [147]. Используя эту закономерность в развитии знаний, все множество основных диагностических моделей СУ можно систематизировать с использованием иерархического принципа, сформулированного в статье "Роль моделей в науке" [147]. "Последовательное добавление данных, или переменных, ведет постепенно к возникновению более совершенных теоретических моделей и, следовательно, к иерархии этих моделей – от относительно простых и абстрактных к более сложным, более конкретным теоретическим построениям". В результате анализа известных диагностических моделей с точки зрения приведенного принципа получена иерархия диагностических моделей СУ (рис. 1.4).

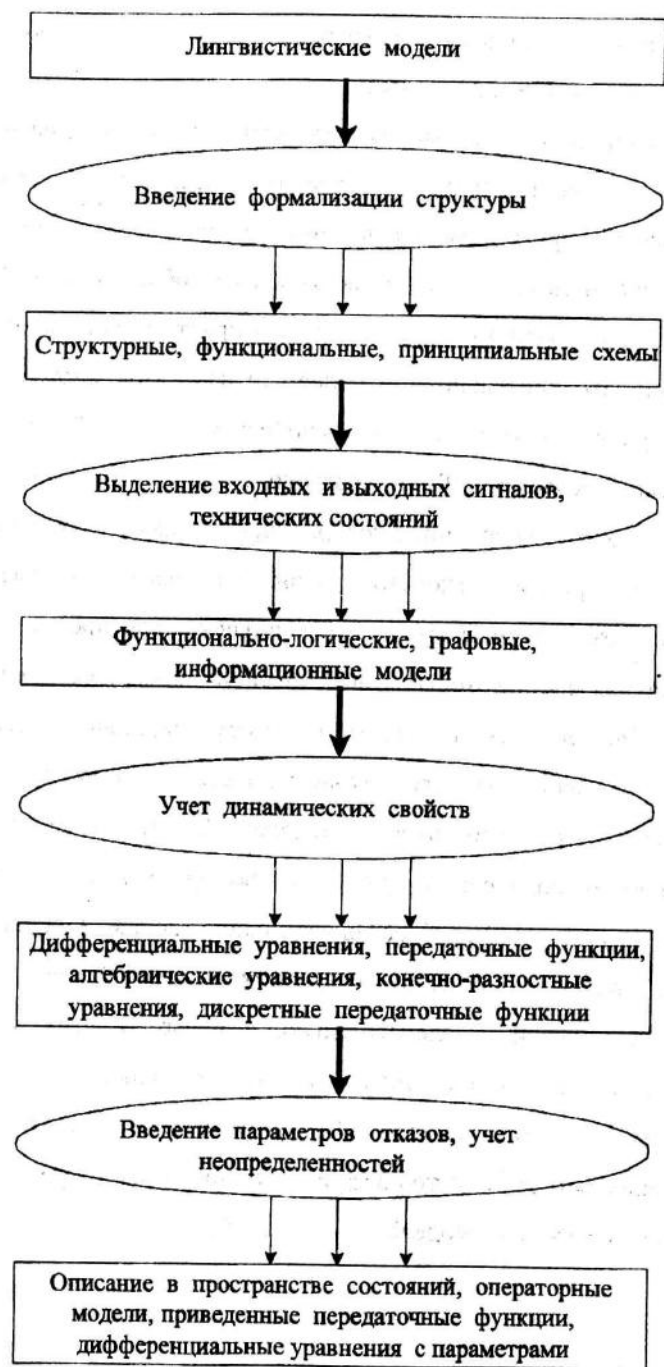


Рис. 1.4. Иерархия диагностических моделей СУ

Первый уровень иерархии занимают наиболее простые модели – лингвистические, для которых иногда используются названия "вербальные", "словесные" модели. Из названий этих моделей следует их особенность. В этих моделях причина со следствием связывается с помощью языковых средств. Лингвистические модели наиболее распространены в практике эксплуатации самолетных СУ, в частности, в форме карт поиска неисправностей в АБСУ-134 [96], в форме словарей дефектов при ремонте систем управления станков с ЧПУ [81], в форме диагностических таблиц или справочников неисправностей при поиске причин отказов в электроприводах [101,114] и других элементах систем [95].

Переход ко второму уровню иерархии моделей оказался возможным посредством выявления структуры информационных и сигнальных связей СУ и отражения этой структуры посредством графических средств. Поэтому второй уровень иерархии включает в себя структурные, функциональные, принципиальные схемы, раскрывающие требуемый для решаемой задачи состав элементов, компонент и способ их соединения. Модели этого уровня являются более детальными по сравнению с лингвистическими и поэтому более совершенными, что обусловило их широкое использование на стадии обработки диагностического обеспечения СУ, а также на стадии эксплуатации систем при низком уровне формализации процедур поиска причин отказов [78, 103].

Выделение таких дополнительных переменных, как входные и выходные сигналы, а также переменных, характеризующих возможные технические состояния компонент СУ, позволило перейти к новому уровню иерархии, включающему в себя функционально-логические, графовые, информационные модели. На этом уровне для формализации существенных особенностей СУ применяются элементы теории булевых функций, теории графов, теории информации. Из диагностических моделей этого уровня наибольшее распространение получили функционально-логические модели в форме таблиц

функций неисправностей [97], функциональных моделей [110], логических моделей [92, 121]. Характерным для этого типа диагностических моделей является использование булевой переменной для описания связи между возможными техническими состояниями системы и результатами проверки поведения доступных измерению выходных сигналов. Наряду с такими диагностическими моделями развитие и применение получили графовые [16, 92] и информационные модели аварийных процессов СУ [15, 16].

В силу того, что динамическое поведение является характерной особенностью СУ, на определенном этапе развития диагностических моделей были проведены исследования по учету динамических свойств. В результате появился следующий уровень диагностических моделей в форме дифференциальных уравнений, передаточных функций, алгебраических уравнений и аналогичных уравнений и функций с дискретными аргументами. В построении этих моделей, как правило, не используются конкретно заданное множество вероятных отказов и его характеристики, а принимается допущение, что все возможные в системе отказы влияют на величины коэффициентов уравнений и функций. Отклонение выходных сигналов аварийной системы относительно номинального поведения представляет собой реакцию системы на тот или иной отказ. Итак, в этих моделях признаки отказов – это отклонения коэффициентов, а признаки реакции формируются соответствующим образом из отклонений выходных сигналов системы. С помощью данных диагностических моделей успешно решаются такие подзадачи общей задачи диагностирования, как обнаружение отказов и поиск места их возникновения. Диагностические модели этого уровня подробно описаны и используются в работах [16, 24, 27, 29, 135]. Подобные по сути этому уровню диагностические модели, но в другой неявной форме нашли применение в работах [35, 151].

Новый уровень диагностических моделей возник в результате попыток моделирования отказов СУ и введения этих моделей в уравнения динамики, а также благодаря учету различных факторов (помех, ошибок, характеристик

отказов, допусков и т.п.), влияющих на степень неопределенности в функционировании системы. К этому уровню относятся диагностические модели, представленные с помощью систем дифференциальных уравнений, передаточных функций, с коэффициентами, являющимися функциями параметров, характеризующих виды отказов из заданного множества. Кроме того, в этих моделях действие различных неопределенных факторов вводится с помощью соответствующих аддитивных слагаемых. В общем случае такие модели представляют собой описание в классе динамических систем с неопределенной динамикой. Первые диагностические модели этого уровня появились и описаны в работе R. Beard [132], причем отказы моделировались как с помощью параметрических отклонений, так и посредством аддитивных сигнальных приращений в уравнениях, представленных в пространстве состояний. Для обнаружения в системе внезапных изменений, вызванных отказами, A. Willsky [10, 153], применяет модели с аддитивными, зависящими от времени возмущениями. Диагностические модели с использованием параметров отказов и помех измерений применялись R. Isermann и G. Geiger при разработке диагностического обеспечения электродвигателя с центробежным насосом [137, 139]. Диагностические модели с использованием параметрических и сигнальных отклонений, характеризующих возможные отказы, применялись Л.А. Мироновским для решения задач обнаружения отказов и поиска их места [24, 88]. Параметрическое и сигнальное моделирование отказов датчиков и других компонент системы, а также учет различных неопределенностей использует Р.М. Frank [136] в подходе к разработке диагностического обеспечения. Применение теории интервального анализа позволило Е.К. Корнаушенко построить диагностические модели, учитывающие неопределенности многих факторов [28]. Случайную природу отказов учитывает Б.И. Доценко при построении модели аварийного процесса в системе [19]. В работах А.В. Латышева используются диагностические модели с учетом параметрических характеристик отказов, влияющих на

соответствующие операторы системы [80]. В ряде работ автора [41, 49, 50, 53] применялась параметризация отказов для построения диагностических моделей. Использование диагностических моделей этого уровня иерархии позволяет решать множество практических задач диагностирования, в результате чего можно обнаруживать отказы в СУ, находить их место и определять причину возникновения. Новый уровень диагностических моделей дает возможность производить диагностирование СУ с большей глубиной и достоверностью благодаря более полному отражению свойств СУ как объекта диагностирования.

Новый уровень диагностических моделей связан с более глубоким изучением характера проявления отказов, поэтому рассмотрим более подробно основные характеристики отказов. Типичные отказы в СУ [6, 21] могут быть представлены с помощью классификации (рис. 1.5). Приведенная классификация удовлетворяет требованиям выдержанности и полноты, кроме признака по видам проявления. Это объясняется существенной зависимостью видов отказов от функциональных элементов системы, принципа их действия, этапа жизненного цикла и других факторов. Вместе с тем в выделенные виды проявления укладываются наиболее часто встречающиеся, характерные виды отказов СУ. Анализ известных моделей отказов свидетельствует о том, что используется два типа моделей: в форме параметров, входящих в определенных зависимостях в коэффициенты диагностических моделей, и в форме соответствующих дополнительных сигналов к основным сигналам системы.

Проанализируем диагностические модели нижнего уровня с точки зрения учета характеристик отказов. В большинстве известных исследований популярно такое допущение об отказах: в СУ возможны однократные отказы, разделенные во времени так, что осуществимо решение задачи диагностирования за отведенное время [10, 19, 28, 79, 88, 132, 136, 138, 153]. В ряде известных моделей используется предположение о внезапности отказов

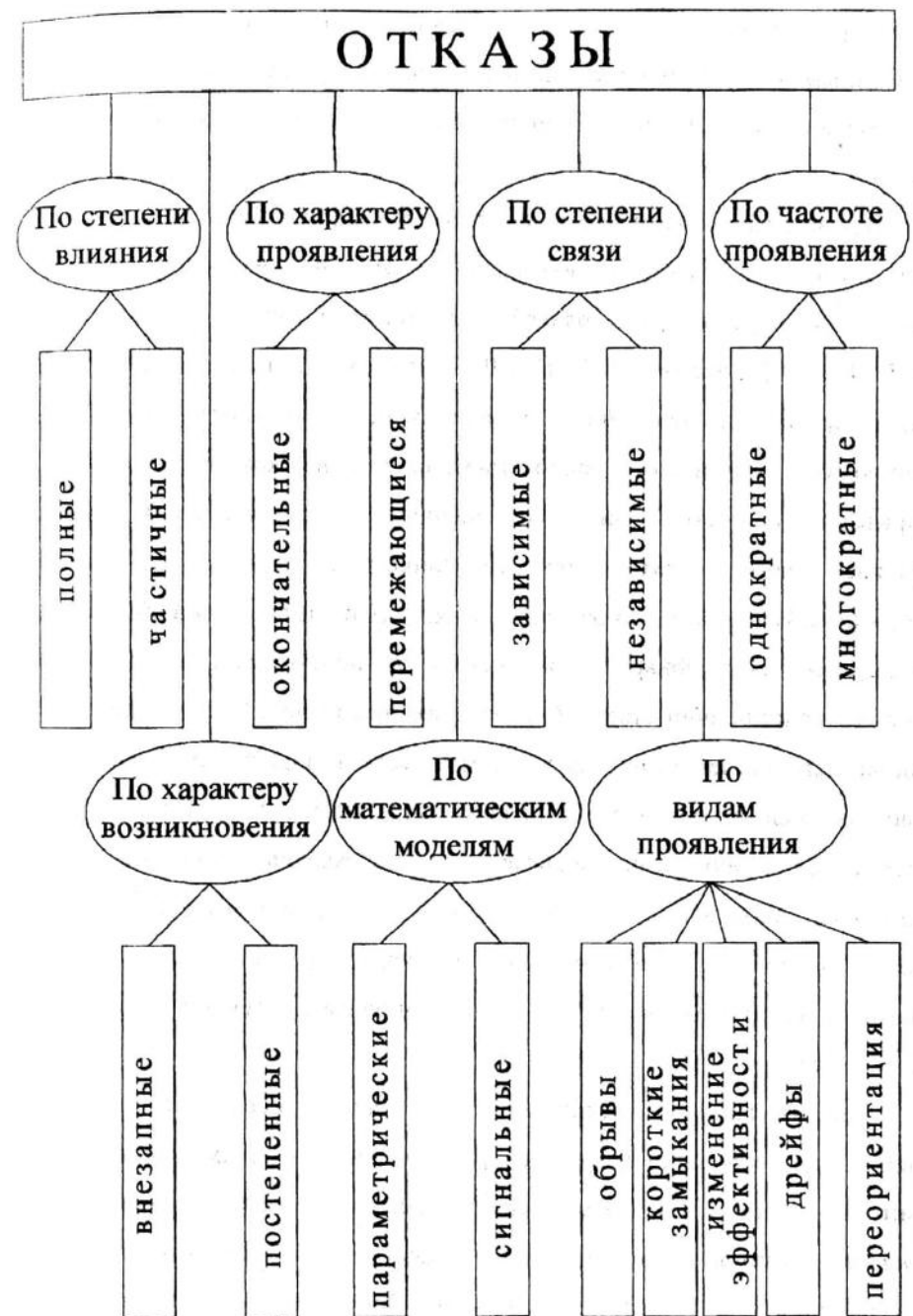


Рис. 1.5. Классификация отказов в СУ

[10, 153], а в остальных моделях предполагается, что отказы в СУ – постепенные и на интервале диагностирования существенно не изменяют своих характеристик, поэтому их можно считать константными [19, 28, 88, 109, 136, 139].

В известных диагностических моделях моделируются не виды отказов, а факт появления отказа с помощью параметрических или сигнальных отклонений, например, факт появления отказа в датчиках или компонентах СУ [23, 28, 80, 136], в элементах СУ [10, 30, 58, 59, 88, 132, 139, 153]. Как правило, в анализируемых исследованиях нет прямого моделирования видов отказов, а производится косвенное, предполагающее, что возможные виды отказов покрываются соответствующими отклонениями коэффициентов или сигналов. Причина такого состояния при моделировании отказов заключается в следующем. Напомним, что решение задачи диагностирования в общем случае заключается: 1) в обнаружении отказов; 2) поиске места их появления; 3) определении причин отказа. Анализ известных решений таких задач и опыт собственных исследований дают возможность говорить об относительной самостоятельности перечисленных подзадач и их различии. Поэтому вполне естественным и обоснованным является подход, заключающийся в построении для каждой подзадачи своих диагностических моделей, в которых отражаются соответствующие характеристики отказов. Предложенные структуры диагностических моделей [53, 64, 109] в наибольшей степени удовлетворяют такому подходу.

Анализ диагностических моделей нижнего иерархического уровня наиболее целесообразно проводить с точки зрения решаемых задач, так как вне контекста задачи модель теряет смысл. Наиболее близкими к сформулированной общей постановке задачи диагностирования СУ являются задачи, решаемые в исследованиях R. Beard [132], R. Isermann [139], Л.А. Мироновского [88] и других авторов. Как правило, в постановках этих задач отсутствуют заданное множество видов отказов, количество контрольных

точек ограничено числом функционально необходимых выходов системы, жестко задается режим функционирования системы. В этих исследованиях неявно задается глубина диагностирования с точностью до функционального блока или с точностью до отклонения коэффициентов модели. Очевидно, что эти различия в постановках задач порождают диагностические модели, не отражающие в полной мере существенных особенностей СУ в соответствии с общей постановкой задачи. Проведенные исследования позволили использовать достоинства известных моделей, устранив их недостатки, для построения диагностических моделей, соответствующих общей постановке задачи диагностирования СУ [45, 48, 61, 63, 109].

В результате этих исследований создана методология построения диагностических моделей, позволяющая учитывать особенности СУ как объекта диагностирования, удовлетворяющая положениям теории построения математических моделей физических объектов, дающая возможность в наибольшей степени учитывать специфику современных постановок актуальных практических задач и обеспечивать их конструктивное и эффективное разрешение.

Разработанная методология построения диагностических моделей позволяет моделировать СУ как сложную систему, состоящую из разнородных элементов, учитывать динамический характер поведения, отражать процессы, протекающие в замкнутом контуре при возникновении отказов, моделировать характеристики отказов из заданного множества для соответствующих подзадач диагностирования. Такую особенность СУ, как различная информативность сигналов относительно характеристик отказов, также удается отразить в моделях, а затем в последующем использовать для формирования оптимального состава контрольных точек. "Размытость" сигналов и нелинейность свойств СУ могут быть учтены и в соответствующих конструкциях диагностических моделей. При построении диагностических моделей применяется принцип преемственности, что позволяет в наиболее

полной мере учитывать накопленные знания о поведении СУ в форме соответствующих математических моделей, отражающих как номинальный, так и аварийные режимы функционирования. Достоверность полученных диагностических моделей обуславливается не только достоверностью исходных моделей, но и результатами проверки соответствия их характеристик имеющимся в распоряжении экспериментальным данным.

1.4. Анализ методов диагностирования СУ

В обобщенном виде объект диагностирования можно представить так, как показано на рис. 1.6. В общем случае СУ описывается математической моделью

$$y(t) = F[u(t), f(t), x(t), \theta, \lambda],$$

где $y(t)$ и $u(t)$ – измеряемые переменные входа и выхода; λ – неизмеряемые возмущения; $x(t)$ – частично измеряемые переменные состояния; θ – неизмеряемые коэффициенты модели; λ – параметры, характеризующие виды отказов заданных, множеством D , $F[\cdot]$ – нелинейный оператор.

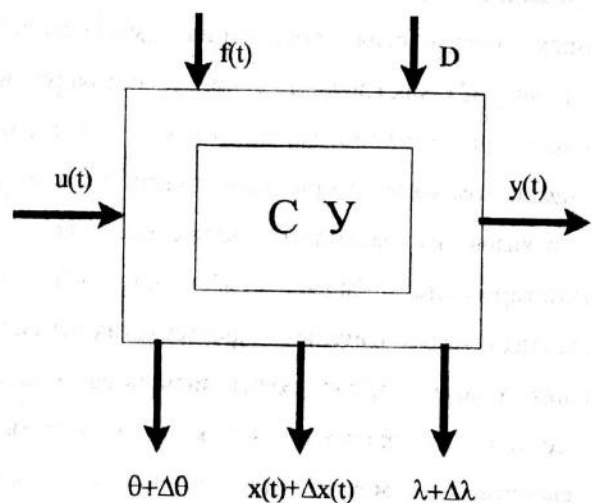


Рис. 1.6. Обобщенное представление объекта диагностирования

Отказы СУ приводят к изменению переменных состояния $x + \Delta x$, изменению параметров видов отказов $\lambda + \Delta \lambda$ и изменению коэффициентов модели $\theta + \Delta \theta$. Все эти изменения вызывают появление соответствующих приращений в выходном сигнале $y(t)$.

Изучение соответствующих методов диагностирования, применимых к СУ, позволило произвести структуризацию задач диагностического обеспечения и представить его общей схемой (рис. 1.7). В диагностировании СУ можно выделить три наиболее характерных этапа. Первый – обработка данных. Он связан с исследованием СУ как объекта диагностирования в целях построения математических моделей аварийных процессов, вызванных вероятными отказами. Затем выбираются методы, с помощью которых формируются алгоритмы получения оценочных значений требуемых диагностических признаков СУ. На втором этапе решается задача обнаружения отказов. Здесь на основании полученной информации определяются отклонения оценочных величин диагностических признаков относительно их номинальных значений. Далее эти отклонения используются для установления вида технического состояния системы и фиксации момента времени недопустимого отклонения процесса. Диапазоны допусков устанавливаются в результате анализа номинального и аварийного процессов в целях их надежного разграничения. На третьем этапе осуществляется идентификация отказов, заключающаяся в формировании процедур поиска места возникновения отказа и установления его причины. При этом производится формирование соответствующих признаков и образцов для решения каждой задачи этого этапа.

Существует множество методов, применяемых для разработки диагностического обеспечения СУ в соответствии с общей схемой (рис. 1.7). Задача разработки диагностического обеспечения представляет собой комплексную задачу, решение которой не может быть получено в рамках одного, даже достаточно универсального метода. Анализ разработок многих



Рис. 1.7. Общая схема разработки диагностического обеспечения СУ

практических систем диагностирования СУ показал, что в процессе создания процедур диагностирования используется совокупность взаимосвязанных теоретических методов, которую более целесообразно называть подходом. Для каждого подхода можно выделить ведущую идею, замысел, принцип, позволяющие выбрать наиболее приемлемые методы и сформировать их в соответствующую конструктивную систему теоретических средств разработки информационного и математического обеспечения процесса диагностирования СУ. Исследование известных подходов к диагностированию СУ с точки зрения используемых диагностических признаков показывает, что они могут быть классифицированы на три основных:

- сигнальный;
- параметрический;
- сигнально-параметрический.

Рассмотрим более подробно характерные особенности каждого из подходов.

Сигнальный подход, или сигнальное диагностирование СУ, основано на применении в качестве диагностических признаков оценок состояния $\hat{x}(t)$ или выходных сигналов $\hat{y}(t)$. При этом оценочное поведение системы воспроизводится с помощью фильтров Калмана-Бьюси или наблюдателей Люенбергера, использующих доступные измерению сигналы $u(t)$ и $y(t)$. Обобщенная схема подхода представлена на рис. 1.8. Формирование теоретической модели и оценки состояния или выхода составляет содержание этапа обработки данных. В целях обнаружения отказов в функционировании СУ формируются разности $\Delta\hat{x}(t)$ или $\Delta\hat{y}(t)$, содержащие информацию о текущем техническом состоянии, и производится допусковый контроль. Границы допуска формируются из условия разграничения нормального протекания процесса от аварийного, дефектного. Как правило, идентификация отказа заключается в определении места отказа, к примеру, датчик угла,

угловой скорости, сервопривод, регулятор и т.п. Для формирования процедур определения места отказа применяются имитационные методы машинного моделирования отказавшей системы и логические методы классификации. В качестве первой теоретической работы по сигнальному диагностированию СУ следует назвать исследования R. Beard [132].

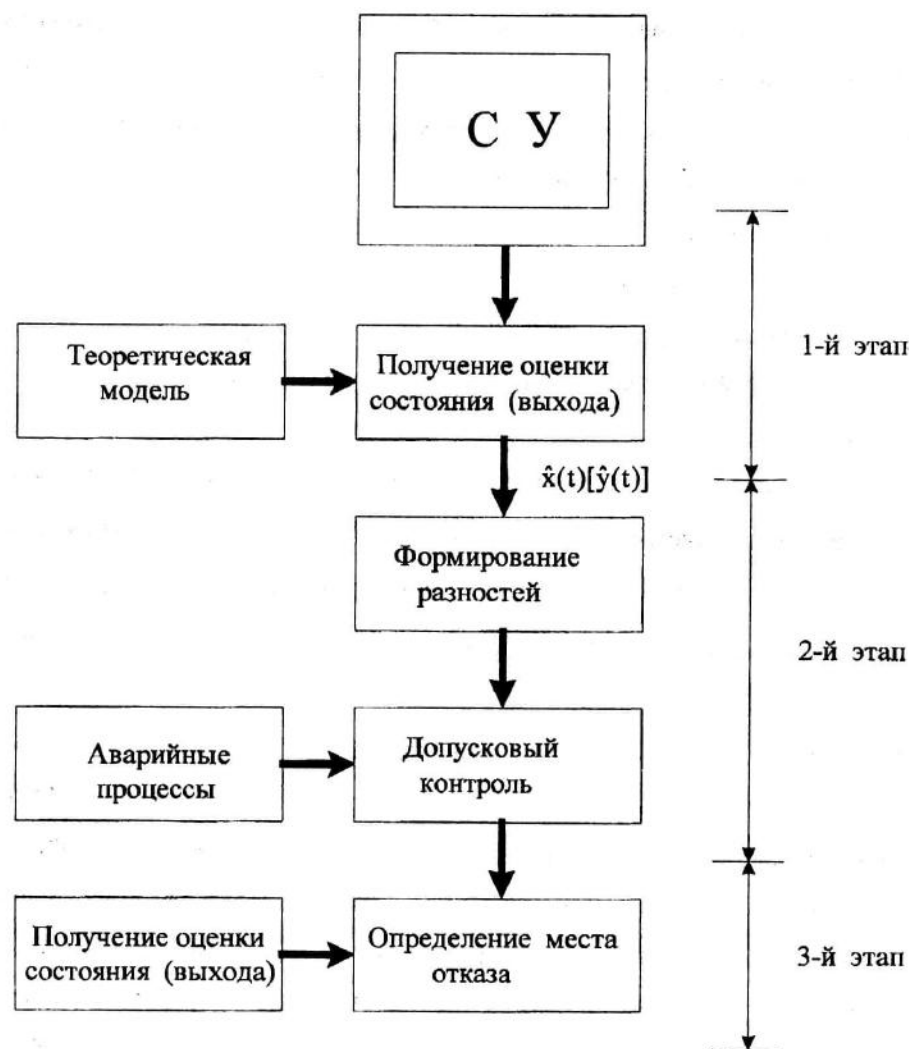


Рис. 1.8. Сигнальное диагностирование СУ

В последующем появился ряд работ R. Clark по диагностированию датчиков [133, 134]. В последние годы значительные исследования по дальнейшему развитию подхода проводятся Р. Frank и его сотрудниками [136]. Существенные результаты по функциональному диагностированию в пространстве сигналов получены Л.А. Мироновским и его последователями [24, 88]. Сигнальный подход к диагностированию применим для большого множества видов отказов и классов систем, учитывающих существенные нелинейности. При практической реализации подхода значительно экономятся вычислительные ресурсы и время диагностирования.

Характерной особенностью параметрического подхода (параметрического диагностирования) является получение оценочных значений коэффициентов модели θ на основании известной модели номинального процесса и измерений входных $u(t)$ и выходных $y(t)$ сигналов. Подход базируется на использовании того факта, что многие физические отказы характеризуются изменениями соответствующих параметров λ , например, отказы резисторов, емкостей, индуктивностей, моментов инерции и т.п. Эти параметры входят в коэффициенты θ модели системы. Содержание основных этапов параметрического подхода представлено на рис. 1.9.

На этапе обработки данных разрабатывается теоретическая модель процесса, определяются функциональные отношения $\theta = \phi(\lambda)$, производится формирование оценки параметров системы θ на основании измерения входных $u(t)$ и выходных $y(t)$ сигналов.

На втором этапе осуществляется расчет параметров отказов как $\lambda = \phi^{-1}(\theta)$, определяются отклонения параметров отказов $\Delta\lambda$ относительно их номинальных значений, производится контроль отклонений $\Delta\lambda$. Последний этап состоит в определении места отказа из заданного множества, в установлении величины и причины отказа.

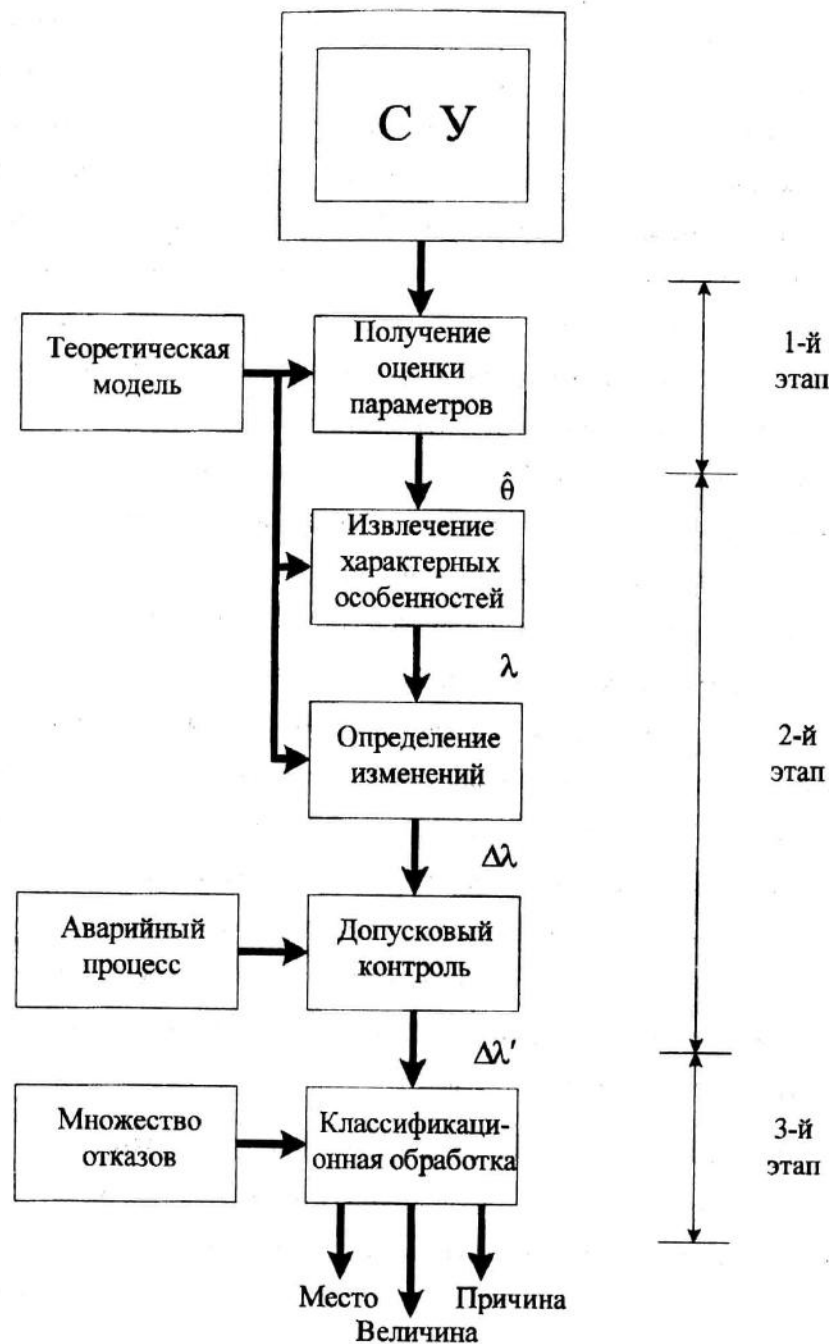


Рис. 1.9. Параметрическое диагностирование СУ

Одной из первых обстоятельных работ по применению методов оценки параметров к задачам диагностирования является работа Я.А. Гельфандбейна [12]. Параметрический подход нашел широкое использование во многих исследованиях, описанных в обзорах [13, 91]. Наиболее глубокое развитие подход получил в работах R. Isermann [138, 139], конструктивное применение подхода описано в диссертации G. Geiger [137]. Определенные результаты по использованию идентификации при диагностировании сложных систем достигнуты А. Латышевым [80], Р.М. Юсуповым [20] и др.

Достоинства параметрического подхода состоят в раннем определении отказов системы в режиме ее функционирования. Использование моделей СУ позволяет оперативно оценить ее параметры, на которые непосредственно влияют отказы.

Особенностью третьего, нового подхода – сигнально-параметрического – является использование в качестве диагностических признаков системы отклонений выходных сигналов $\Delta y(t)$ и их характеристик, а также отклонений параметров отказов $\Delta \lambda$. На рис. 1.10 представлена общая схема подхода. Этап обработки данных связан с изучением возможных аварийных состояний системы управления при возможных отказах в целях построения математических моделей, отражающих аварийные и номинальный (эталонный) режимы функционирования. На основании этих моделей формируется иерархия диагностических моделей для решения последующих задач.

Исследование структурных и сигнальных свойств полученных диагностических моделей позволяет обоснованно произвести декомпозицию исходного математического описания, сформировать множество контрольных точек, выбрать требуемую структуру и характер управляющих сигналов, обеспечивающих полную диагностируемость системы в отношении множества возможных отказов. На этапе обнаружения отказов с помощью соответствующих диагностических моделей формируются определенные совокупности сигнальных признаков, используемых в допусковом контроле

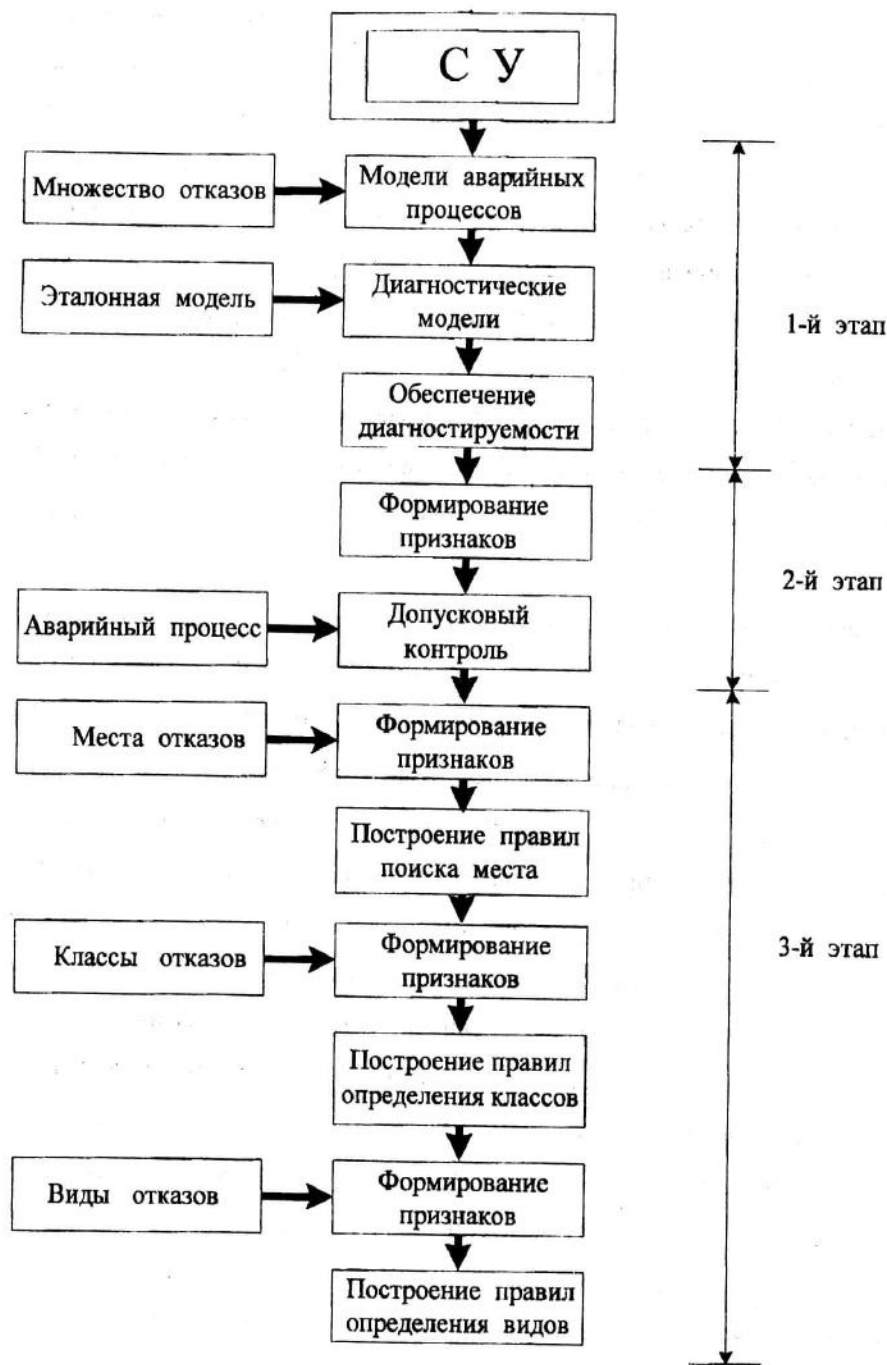


Рис. 1.10. Сигнально-параметрическое диагностирование СУ

для установления факта появления в системе любого отказа из заданного множества.

На третьем этапе вначале производится формирование совокупностей сигнальных признаков и их комбинаций для обеспечения однозначного установления места появления отказа из заданного множества возможных. На основании этих признаков строятся соответствующие правила поиска места. Далее для каждой конструктивно законченной части системы, с точностью до которой определяется место отказа, формируются классы отказов и для каждого класса устанавливается характерный признак. На основании полученных признаков строятся правила определения классов отказов. Элементы класса представляют собой виды отказов. Для каждого класса формируются признаки, позволяющие однозначно определять его элементы – виды отказов. Затем по этим признакам синтезируется процедура установления видов отказов.

Недостатки первого и второго подходов – это отсутствие системного аналитического решения всех основных задач диагностирования СУ. Так, в параметрическом подходе выбор теоретической модели для обеспечения разрешимости уравнения $\lambda = \varphi^{-1}(\theta)$ осуществляется эвристически. В сигнальном подходе на эвристической основе реализуются процедуры классификации места отказа. В третьем подходе использование концепции, отражающей характерные особенности диагностических моделей нового уровня иерархии, позволяет находить решение задач всех этапов аналитически и разработать машинно-ориентированные процедуры синтеза диагностического обеспечения. Следует также отметить, что первый подход неприменим для диагностирования систем с существенными (негладкими) нелинейностями. Второй подход основывается на использовании только линеаризованных моделей системы и не всегда применим для случая отказов, приводящих к изменению структуры модели. В этом плане возможности

сигнально-параметрического диагностирования значительно шире, так как использование принципов подхода позволяет разрабатывать диагностическое обеспечение для некоторых классов систем с существенными нелинейностями, а также для систем, подверженных структурным отказам. В первых двух подходах центр вычислительной тяжести диагностирования приходится на процедуры оценки в реальном масштабе времени переменных состояния и коэффициентов моделей системы, что требует значительных объемов вычислительных ресурсов и времени. В третьем подходе трудоемкими являются задачи, которые решаются не в реальном масштабе времени, а при разработке диагностического обеспечения. Сигнально-параметрический подход обладает большей общностью, аналитичностью и конструктивностью по сравнению с другими подходами [63, 109, 142].

Истоки нового сигнально-параметрического системного подхода находятся в первых двух. Системное использование как сигнальных, так и параметрических свойств СУ позволило разработать новые и применять известные методы для аналитического решения основных задач диагностирования с заданной глубиной на единой методологической основе.

1.5. Постановка научных задач исследования

Проведенный аналитический обзор практического диагностирования СУ на всех этапах жизненного цикла показывает, что существует целый ряд нерешенных задач, которые можно укрупненно объединить в основные, ключевые. Первая. Повышение достоверности технического диагноза до уровня, обеспечивающего требуемую эффективность ремонтно-восстановительных работ. Вторая. Обеспечение точности диагностирования, соответствующей имеющимся в наличии ремонтно-восстановительным ресурсам. Третья. Компьютерная автоматизация процессов диагностирования с заданными достоверностью, точностью и оперативностью.

Объектом данного исследования являются как непрерывные, так и

цифровые СУ. В качестве объектов управления в этих системах рассматриваются физические объекты и процессы, хорошо изученные как в номинальных, так и аварийных режимах функционирования и описываемые в классах линейных и нелинейных динамических систем с непрерывным и дискретным временем. Все другие функциональные элементы СУ также считаются хорошо изученными и описанными в классах соответствующих линейных и нелинейных математических моделей. Предполагается, что для каждого функционального элемента и всей системы сформировано множество возможных видов отказов и установлены характеристики отказов. Допускается подача на объект диагностирования стимулирующих воздействий, а также измерения его реакций в соответствующих контрольных точках.

СУ как объект диагностирования является специфическим объектом в силу использования в ее составе многочисленных разнородных элементов и компонент динамического поведения, наличия замкнутого контура, различной информативности снимаемых сигналов, большого спектра физических отказов, "размытости" сигналов, нелинейных свойств и характеристик. Отражение такой "специфичности" СУ в теории технической диагностики только начинается, о чем свидетельствует построенная иерархия диагностических моделей (см. рис. 1.4). Уровень разработки диагностических моделей СУ должен соответствовать требованиям практических задач. В связи с этим в области построения диагностических моделей СУ существует ряд задач, требующих разработки новой концепции диагностических моделей, а также методологии их построения и анализа.

Описанные практические задачи диагностирования не могут быть успешно разрешены в рамках известных подходов: сигнального и параметрического. Более того, при разработке диагностического обеспечения с помощью этих подходов применяются неформализованные методы и приемы, требующие дополнительных экспериментальных исследований, а также принятия эвристических решений. Все это свидетельствует о несовершенстве

используемой при разработке технологии. Поэтому актуальной задачей является создание системного сигнально-параметрического подхода, основанного на согласованном применении аналитических методов, позволяющих формализовано решать все основные задачи диагностического обеспечения СУ с помощью машинных программных средств в рамках современных информационных технологий. Актуальность задачи компьютерной автоматизации процесса диагностирования обуславливает соответствующие требования к результатам разработки диагностического обеспечения СУ. Автоматизацию процессов диагностирования наиболее эффективно производить с использованием соответствующих экспертных оболочек. Поэтому получаемые при решении основных задач диагностирования СУ результаты должны быть в форме совместимых программных модулей, пригодных для наполнения экспертной оболочки соответствующими знаниями и правилами логического вывода.

Основными задачами диагностического обеспечения СУ в соответствии с сигнально-параметрическим подходом являются: 1) обнаружение отказов в системе; 2) поиск места отказа; 3) установление класса отказов; 4) определение вида отказа; 5) построение иерархии диагностических моделей, необходимых для получения согласованных и взаимосвязанных решений предыдущих задач.

В общем виде математическая модель СУ в аварийном режиме может быть представлена системой уравнений

$$\dot{\tilde{x}}(t) = f[\tilde{x}(t), u(t), \xi(t)]; \tilde{x}(t_0) = \tilde{x}_0, \quad (1.1)$$

$$\dot{\tilde{y}}(t) = g[\tilde{x}(t), u(t), \lambda, v(t)]; t \in T, \quad (1.2)$$

где $\tilde{x}(t)$ – вектор состояния отказавшей системы, $\tilde{x}(t) \in X^n$; $u(t)$ – вектор управления, $u(t) \in U^r$; $\tilde{y}(t)$ – вектор измеряемых переменных, $\tilde{y}(t) \in Y^m$; λ – вектор параметров, характеризующих соответствующие свойства отказов, $\lambda \in \Omega^q$; $\xi(t)$ и $v(t)$ – векторы ошибок моделирования, помех измерения.

Для каждой из первых четырех основных задач исходными данными являются диагностические модели, построенные исходя из конкретной постановки задачи, на основании модели (1.1, 1.2), множества видов отказов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$ характеристик ошибок и помех измерения; измеряемых сигналов системы; допустимого множества управляющих воздействий; заданного времени диагностирования. Требуется по наблюдению "зашумленных" и искаженных отказами входных и выходных сигналов системы сформировать алгоритмы определения соответствующих характеристик отказа (факта наличия, места, класса и вида). Диагностические модели для каждой из основных задач увязываются в иерархическую систему, так как получаемые в результате решения задач алгоритмы должны быть взаимосвязаны между собой в комплексе диагностического обеспечения.

В совокупности рассмотренные задачи составляют проблему данного исследования. Общая формулировка проблемы: создание теоретических и реализационных основ построения диагностического обеспечения СУ с использованием новой концепции диагностических моделей для повышения качественных показателей компьютерных систем диагностирования.

В сформулированной проблеме исследования выделим следующие три комплексные задачи:

1. Формирование концептуальных основ и разработка методологии построения иерархии обобщенных классов диагностических моделей для параметризованных разнотипных признаков отказов.

2. Разработка на предложенной концептуальной основе системного сигнально-параметрического подхода для создания математического обеспечения процесса компьютерного диагностирования с заданной достоверностью, глубиной и оперативностью.

3. Решение на основе разработанной теории прикладных задач, создание и внедрение в производство программных средств для проектирования диагностического обеспечения и программных комплексов диагностирования различных СУ.

Суть первой комплексной задачи заключается в формировании для

диагностических моделей новой системы взглядов, в наибольшей степени отвечающих современным и перспективным задачам диагностирования СУ, а также требованиям современной информационной технологии проектирования и эксплуатации диагностического обеспечения. Конструктивным воплощением новой системы взглядов – концепции – должны быть методы и соответствующая методология построения диагностических моделей и их иерархии, обеспечивающей потребности всех основных задач диагностирования СУ. Диагностические модели должны отражать характерные особенности СУ как объекта диагностирования на основе применения как сигнальных, так и параметрических признаков отказов, а также математических средств адекватного описания аварийных процессов, вызванных отказами, характеристики и множество которых известны.

Вторая комплексная задача связана с разработкой взаимосвязанной совокупности теоретических методов решения основных задач технического диагностирования СУ на основе использования иерархии диагностических моделей, порожденных методологией, отражающей новую концепцию. Особенностью совокупности методов сигнально-параметрического подхода должно быть максимальное использование как сигнальных, так и параметрических характеристик диагностических моделей в целях разработки информационного и математического обеспечения процесса компьютерного диагностирования СУ с заданной достоверностью, глубиной и оперативностью.

Особенность третьей комплексной задачи состоит в разработке диагностического обеспечения для СУ. На основании полученного опыта требуется сформировать инженерные технологии решения прикладных задач, а также создать и внедрить программные средства для разработки диагностического обеспечения СУ и программные комплексы диагностирования конкретных систем.

Рассмотренные комплексные задачи в совокупности представляют собой суть проблемы данного исследования. Выбранные способы и результаты решения сформулированной проблемы описаны в последующих главах работы.

ГЛАВА 2

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СУ

Диагностические модели представляют собой специфические математические модели СУ. Традиционные математические модели систем отражают особенности их номинального режима функционирования. Диагностические модели описывают существенные свойства аварийных режимов, вызванных различными отказами. Диагностическая модель строится под конкретную задачу. Диагностирование СУ состоит из решения ряда взаимосвязанных основных задач. Для аналитического решения этих задач требуется новая концепция диагностических моделей, порождающая их иерархию. Форма диагностической модели существенно зависит от класса системы управления и характера отказа. Рассмотрены классы линейных, нелинейных систем, а также систем с существенными статическими нелинейностями как для "малых", так и для "больших" отказов.

2.1. Основные положения

Исследование проблемы диагностирования СУ и путей ее решения с помощью различных подходов позволило произвести ее структуризацию и представить совокупность новых взаимосвязанных задач (рис. 2.1). Содержательная суть каждой задачи:

1. Построение иерархии диагностических моделей. Задача заключается в изучении и исследовании СУ при действии отказов из заданного множества D и построении для каждой из последующих задач соответствующих диагностических моделей, отражающих существенные свойства, характеристики и связи объекта диагностирования. При этом выбор формы представления моделей производится с точки зрения используемых аналитических методов решения задачи.

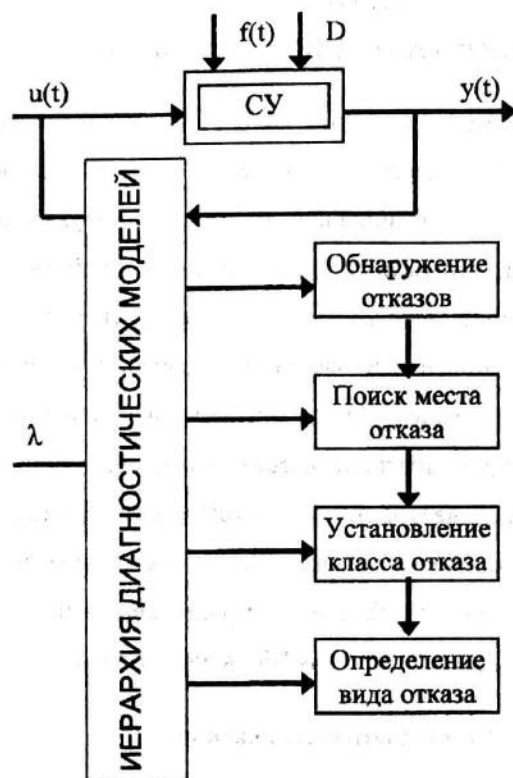


Рис.2.1. Структурная схема основных задач диагностирования СУ

2. Обнаружение отказов. Суть этой задачи состоит в установлении факта появления в СУ отказов из заданного множества D , так как момент времени возникновения отказа представляет собой неопределенное событие. В результате решения задачи требуется определить оптимальную в определенном смысле совокупность контролируемых сигналов, величины допусков на эти сигналы, алгоритмы формирования заключения.

3. Поиск места отказа. После установления факта наличия отказа в объекте диагностирования необходимо найти его предельно возможную конструктивно законченную часть (подсистему, блок, элемент), в которой произошел отказ. Таким образом, задача поиска места отказа сводится к задаче нахождения отказавшей составной части объекта диагностирования. При этом следует сформировать оптимальную с точки зрения технико-экономического

критерия совокупность признаков, представляющих собой соответствующие функции от сигналов в контрольных точках системы, и построить удовлетворительные для условий задачи диагностирования правила определения места отказа.

4. Установление класса отказа. Множество возможных видов отказов СУ, как правило, задается перечислением видов отказов, которые специалист хотел бы знать в результате диагностирования в целях дальнейшего эффективного восстановления объекта. Виды отказов могут быть объединены в соответствующие классы по признаку наличия общих свойств. Задача установления класса отказа заключается в классификации появившегося отказа по результатам доступных измерений. Путь решения задачи состоит в формировании совокупности классов и их признаков, оптимизации признакового пространства и построении удовлетворяющих условиям задачи диагностирования процедур установления класса отказа.

5. Определение вида отказа. В общем случае класс объединяет несколько видов отказов, поэтому после установления принадлежности появившегося отказа к соответствующему классу требуется определить его конкретный вид, т.е. выявить физические изменения, вызвавшие отказ объекта. При решении этой задачи вначале формируются признаки видов отказов для каждого класса. Признаки должны быть такими информативными, чтобы минимальное их число обеспечивало однозначное определение всех видов отказов данного класса. Затем на основе сформированной совокупности признаков строятся исходя из условий общей задачи диагностирования соответствующие правила определения вида отказа.

Рассмотрение содержания задач структурной схемы (см. рис.2.1) показало, какое значение имеет построение иерархии диагностических моделей для решения общей задачи диагностирования СУ. Отсутствие общей методологии и конструктивных методов построения диагностических моделей, удовлетворяющих рассмотренным задачам, обусловило необходимость постановки первой комплексной задачи, состоящей в формировании новой

концепции диагностических моделей и разработке методологии построения иерархии новых более общих классов диагностических моделей для параметризованных разнотипных признаков.

Проведенные исследования комплексной задачи позволили найти эффективные пути ее решения и выработать новую концепцию диагностических моделей. Основные положения этой концепции заключаются в следующем:

1. Объект диагностирования рассматривается как система, состоящая из взаимосвязанных функциональных элементов, реализующих соответствующий принцип управления и обеспечивающих требуемое качество управления в номинальном режиме. Математическая модель объекта в номинальном режиме функционирования описывается в классе динамических систем. Известны математические модели работоспособных функциональных элементов. Определены доступные измерению сигналы.

2. Для каждого функционального элемента системы сформировано конечное подмножество возможных видов отказов $D_v = \{d_{v1}, d_{v2}, \dots, d_{vq}\}$, где $v = \overline{1, k}$; k – количество функциональных элементов в системе; q – количество

видов отказов. Множество видов отказов всей системы $D = \bigcup_{v=1}^k D_v$.

Сформулированы рабочие гипотезы о потоке отказов и характере их проявления, т.е. о свойстве отказов. Известны статические и динамические характеристики функциональных элементов для всех возможных видов отказов.

3. Формулируется общая задача диагностирования СУ, исходя из которой ставятся основные задачи: обнаружения отказов, поиска места, установления класса, определения вида отказа. Для каждой основной задачи диагностирования строятся соответствующие диагностические модели, отражающие необходимые свойства объекта именно для этой задачи.

4. При построении диагностических моделей для каждой основной

задачи устанавливают, исходя из особенностей СУ и множества D , прямые и косвенные диагностические параметры, на основании которых формируют как количественные, так и качественные прямые и косвенные признаки отказов и диапазоны их изменения. Количественные признаки отказов – это отклонения диагностических параметров от значений, характеризующих номинальный режим функционирования СУ. Качественные признаки – это отражение факта наличия и отсутствия количественных признаков в терминах булевой переменной.

5. Диагностическими моделями объекта называются математические модели, связывающие косвенные признаки отказов с прямыми. В зависимости от используемых признаков отказов различают диагностические функциональные модели (ДФМ) и диагностические логические модели (ДЛМ). ДФМ получают в результате использования прямых и косвенных признаков отказов в форме отклонений, а ДЛМ – в форме булевых переменных.

6. Диагностические модели для каждой из основных задач строятся в терминах соответствующих прямых признаков отказа. Так, для задачи определения вида используется признак вида отказа, для задачи установления класса – признак класса отказа, для задачи поиска места – признак места отказа и для задачи обнаружения – признак появления отказа. В качестве косвенных признаков во всех задачах используются соответствующие количественные признаки в форме: а) отклонений доступных измерению сигналов; б) функций от отклонений сигналов. Кроме того, применяются также качественные признаки в форме булевых переменных.

7. Иерархия как функциональных, так и логических диагностических моделей начинает строиться с нижнего уровня – с моделей для задачи определения вида отказа, и заканчивается на верхнем уровне моделями обнаружения отказов. При переходе от одного уровня иерархии к другому изменяются совокупности прямых и косвенных признаков отказов. Более общими и менее конкретными по отношению к множеству D в этой иерархии

являются диагностические модели верхнего уровня, а менее общими и более конкретными – модели нижнего уровня.

8. Для дальнейшего использования полученные в результате построения иерархии диагностические модели преобразовываются в соответствующие канонические формы: ДФМ – в канонической наблюдаемой форме с использованием инвариантов Кронекера или Эрмита, а ДЛМ – в минимальной форме с применением методов минимизации булевых таблиц.

9. Качество полученных ДФМ анализируется в отношении диагностируемости, т.е. возможности однозначного установления факта наличия соответствующего прямого признака отказа по наблюдениям косвенных признаков. Анализ диагностируемости производится с помощью формальных критериев. При неудовлетворительном качестве ДФМ изменяется их структура путем введения других косвенных признаков или меняется характер управляющих воздействий. В результате ряда таких изменений добиваются полной диагностируемости моделей относительно соответствующих прямых признаков отказов. Удовлетворяющие критериям диагностируемости ДФМ используются для решения соответствующих задач.

10. ДЛМ строятся на основании структуры диагностируемых ДФМ с помощью определенных правил, позволяющих получить связь между косвенными признаками отказов в терминах булевой переменной в форме прямоугольной таблицы с булевой переменной. Такие диагностические модели используются в каждой из основных задач диагностирования для определения оптимальных совокупностей косвенных признаков, а также для формирования сбалансированных дихотомических ветвей поиска косвенных признаков отказов и деревьев поиска видов отказа для общей задачи диагностирования СУ.

11. Форма представления диагностических моделей СУ должна быть ориентирована на применение современных информационных технологий в проектировании, а также в эксплуатации. Наиболее эффективным воплощением современной технологии в проектировании являются системы

автоматизированного проектирования. Поэтому, для машинного построения иерархий канонических форм ДФМ, а также их анализа на диагностируемость целесообразно использовать конечно-разностную форму уравнений. Форма ДЛМ позволяет применять машинные методы их анализа. Современная информационная технология в эксплуатации характеризуется широким использованием экспертных, знаниеориентированных систем. Поэтому при получении решений основных задач с помощью диагностических моделей необходимо использовать предикатные формы перехода от конечно-разностных уравнений к машинным признакам для построения базы знаний и машины логического вывода.

Изложенная система принципов и представляет новую концепцию диагностических моделей СУ. Следует отметить, что при построении конкретных диагностических моделей физической СУ применяется такая же методология, что и при построении обычных управленческих математических моделей системы. Если же в качестве исходных данных о СУ используются математические модели номинального режима, то диагностические модели строятся с помощью соответствующих математических преобразований. В этом случае адекватность диагностических моделей определяется адекватностью исходного описания и корректностью использования соответствующего математического аппарата преобразований.

В теории автоматического управления различают по структуре математического описания линейные системы, нелинейные с гладкими нелинейностями и системы с существенными нелинейностями. Используя эту классификацию, будем в последующем рассматривать методы построения таких диагностических моделей, как ДФМ. Разработано несколько методов построения различных ДФМ, отличающихся структурой, свойствами. Поэтому при изложении этого материала не будем акцентировать внимание на постановках основных задач диагностирования при использовании соответствующих обозначений прямых диагностических параметров, а именно: α_i – для задачи установления класса; β_i – для задачи поиска места и γ_i – для

задачи обнаружения, а будем применять в теоретическом изложении обобщенный диагностический параметр λ_i и соответствующий ему прямой признак $\Delta\lambda_i$, где i – количество диагностических параметров.

В этом параграфе изложены только основные положения новой концепции построения диагностических моделей для решения общей задачи диагностирования СУ. Конструктивное воплощение концепции в форме теоретических результатов, методов и критериев будет описано в последующем изложении результатов исследования и проиллюстрировано на соответствующих конкретных примерах построения различных форм диагностических моделей функциональных элементов и систем в целом.

2.2. Диагностические функциональные модели для линейных СУ

Достаточно представительным является множество реальных СУ, описываемых в рабочем диапазоне изменения сигналов в классе линейных моделей. Наиболее общей формой аналитического описания этого класса для номинального режима функционирования СУ служит описание в пространстве состояний

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + \xi(k); \quad x(k_0) = x_0; \\ y(k) &= Cx(k) + v(k), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $x(k)$ – вектор состояния системы, $x(k) \in X^n$; $u(k)$ – вектор управления, $u(k) \in U^r$; $y(k)$ – вектор измеряемых переменных, $y(k) \in Y^m$; $\xi(k)$ и $v(k)$ – векторы ошибок моделирования, помех измерения; A , B и C – матрицы соответствующих размерностей, характеризующие СУ; k – номера дискрет, $k \in T$. В аргументах переменных для упрощения записи опущен T_0 – период квантования.

При построении диагностических моделей используется множество возможных физических видов отказов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$. В результате исследования СУ для этого множества видов отказов устанавливаются для

каждой основной задачи диагностирования свои прямые диагностические параметры, существенно не изменяющиеся на интервале диагностирования. Для рассматриваемого общего случая вектор этих параметров $\lambda^T = [\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_\mu]$ и для каждого параметра λ_i известно множество его возможных значений $\lambda_i \in \Omega_i$. Тогда в общем случае линейную динамическую систему, отражающую влияние прямых диагностических параметров λ , можно описать в классе линейных конечно-разностных моделей следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= A(\lambda) \tilde{x}(k) + B(\lambda) u(k) + \xi(k); \quad \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= C(\lambda) \tilde{x}(k) + D(\lambda) u(k) + F(\lambda) + v(k), \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $\tilde{x}(k)$ и $\tilde{y}(k)$ – векторы переменных, характеризующих возмущенное действием отказов движение системы; $D(\lambda)$ и $F(\lambda)$ – матрицы соответствующих размерностей, отражающие влияние параметризованных свойств отказов на выход системы.

В качестве прямых признаков соответствующих свойств отказа используем $\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_{in}$, где λ_{in} – номинальная величина i -го диагностического параметра, а косвенные признаки представляют собой отклонения вектора $\tilde{y}(k)$ от вектора $\hat{y}(k)$, характеризующего номинальное поведение СУ, т.е. $\Delta y(k) = \tilde{y}(k) - \hat{y}(k)$. ДФМ будем различать: 1) по величине прямых признаков отказа (ДФМ для "малых" отказов и для "больших"); 2) по свойствам моделей (ДФМ динамические и статические). Для построения этих классов ДФМ применяются соответствующие методы, описанные в следующих параграфах.

2.2.1. Диагностические модели для "малых" отказов

Деление ДФМ на классы "малых" и "больших" отказов обусловлено таким обстоятельством. В общем случае зависимость сигналов и матриц системы (2.2) от вектора параметров λ нелинейная. Для получения наиболее простых линейных ДФМ используются различные методы, в основе которых лежит линеаризация нелинейных зависимостей. Поэтому диагностические

модели для "малых" отказов справедливы, когда $\Delta \lambda_i \gg \Delta \lambda_i^2$, т.е. это модели линейного приближения. При построении диагностических моделей будем предполагать, что измерение входа-выхода СУ осуществляется точно, так как наличие ошибок моделирования и помех измерения лишь снижает информативность сигналов и усложняет изложение сути методов. Рассмотрим методы построения таких моделей.

Метод аналитической линеаризации. В основе этого метода лежит разложение уравнений возмущенного движения (2.2) в ряд Тейлора [64]. Разложим в ряд Тейлора первое уравнение системы (2.2) без учета $\xi(k)$ для диагностического параметра λ_i относительно номинальных значений вектора параметров λ_H , и в результате получим

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) = x(k+1) + \left. \frac{\partial A(\lambda)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot x(k) \Delta \lambda_i + A \left. \frac{\partial \tilde{x}(k)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot \Delta \lambda_i + \\ + \left. \frac{\partial B(\lambda)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot u(k) \Delta \lambda_i + \frac{1}{2!} \left. \frac{\partial^2 A(\lambda)}{\partial \lambda_i^2} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot x(k) \Delta \lambda_i^2 + \\ + \frac{1}{2!} \left. \frac{\partial^2 \tilde{x}(k)}{\partial \lambda_i^2} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot \Delta \lambda_i^2 + \left. \frac{\partial^2 B(\lambda)}{\partial \lambda_i^2} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot u(k) \Delta \lambda_i^2 + \dots \end{aligned} \quad (2.3)$$

Разложение для второго уравнения таково:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(k) = y(k) + \left. \frac{\partial C(\lambda)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot x(k) \Delta \lambda_i + C \left. \frac{\partial \tilde{x}(k)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot \Delta \lambda_i + \left. \frac{\partial D(\lambda)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot u(k) \Delta \lambda_i + \\ + \left. \frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot \Delta \lambda_i + \frac{1}{2!} \left. \frac{\partial^2 C(\lambda)}{\partial \lambda_i^2} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot x(k) \Delta \lambda_i^2 + C \left. \frac{\partial^2 \tilde{x}(k)}{\partial \lambda_i^2} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot \Delta \lambda_i^2 + \\ + \left. \frac{\partial^2 D(\lambda)}{\partial \lambda_i^2} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot u(k) \Delta \lambda_i^2 + \left. \frac{\partial^2 F(\lambda)}{\partial \lambda_i^2} \right|_{\lambda=\lambda_H} \cdot \Delta \lambda_i^2 \dots \end{aligned} \quad (2.4)$$

При малых $\Delta \lambda_i$, что имеет место в реальных системах для множества видов отказов, связанных с дрейфами, износом, старением и т.п., ряд Тейлора можно ограничить членами первого порядка малости, и, приняв во внимание, что $\partial \lambda_i \approx \Delta \lambda_i$ и $\partial \tilde{x}(k) \approx \Delta x(k)$, после проведения соответствующих преобразований получим

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= A \Delta x(k) + \frac{\partial A(\lambda)}{\partial \lambda_i} x(k) \Delta \lambda_i + \frac{\partial B(\lambda)}{\partial \lambda_i} u(k) \Delta \lambda_i; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k) + \frac{\partial C(\lambda)}{\partial \lambda_i} x(k) \Delta \lambda_i + \frac{\partial D(\lambda)}{\partial \lambda_i} u(k) \Delta \lambda_i + \frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Частные производные матриц $A(\lambda)$, $B(\lambda)$, $C(\lambda)$, $D(\lambda)$ и $F(\lambda)$ по параметру λ_i обозначим соответственно A_i, B_i, C_i, D_i и F_i . В новых обозначениях диагностическая модель описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= A \Delta x(k) + A_i x(k) \Delta \lambda_i + B_i u(k) \Delta \lambda_i; \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k) + C_i x(k) \Delta \lambda_i + D_i u(k) \Delta \lambda_i + F_i \Delta \lambda_i. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Такую диагностическую модель будем называть MD-моделью. Динамические свойства этой модели зависят от собственных значений матрицы A . Очевидно, что динамические свойства MD-модели такие же, как и модели (2.1) для номинального режима функционирования СУ.

Из системы уравнений (2.6) следует, что MD-модель описывается линейными конечно-разностными уравнениями с переменными коэффициентами, причем закон изменения коэффициентов определяется поведением вектора состояния $x(k)$ эталонной модели системы (2.1) и вектора управляющих воздействий $u(k)$.

Если исходная система уравнений (2.2) представлена в одной из наблюдаемых канонических форм [89], то $C(\lambda) = C$ и MD-модель описывается такими уравнениями:

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= A x(k) + [A_i x(k) + B_i u(k)] \Delta \lambda_i; \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k) + [D_i u(k) + F_i] \Delta \lambda_i. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Учет ошибок моделирования, помех измерения, разброса параметров приводит к уравнениям вида

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= A x(k) + [A_i x(k) + B_i u(k)] \Delta \lambda_i + \eta(k); \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k) + [D_i u(k) + F_i] \Delta \lambda_i + \mu(k),\end{aligned}\quad (2.8)$$

где $\eta(k)$ и $\mu(k)$ – векторы, характеризующие степень неопределенности доступных измерению сигналов модели.

Метод построения статических диагностических моделей. Метод основан на использовании статических эталонных моделей, применяемых при решении идентификационных задач [120]. Для уравнений возмущенного движения, представленных в одной из канонических наблюдаемых форм без учета помех и ошибок,

$$\begin{aligned}\tilde{x}(k+1) &= A(\lambda) \tilde{x}(k) + B(\lambda) u(k); \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= C \tilde{x}(k)\end{aligned}\quad (2.9)$$

статическая эталонная модель описывается таким образом:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + B u(k); \hat{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \hat{y}(k) &= C\hat{x}(k).\end{aligned}\quad (2.10)$$

Вычитая из уравнений системы (2.9) соответствующие уравнения системы (2.10), получим:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= \Delta A(\lambda) \tilde{x}(k) + \Delta B(\lambda) u(k); \Delta x(k_0) = 0; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k),\end{aligned}\quad (2.11)$$

Разложив приращения матриц в ряд Тейлора и ограничившись членами первого порядка малости, после соответствующих преобразований уравнения (2.11) можно записать так:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= A_i \hat{x}(k) \Delta \lambda_i + B_i u(k) \Delta \lambda_i; \Delta x(k_0) = 0; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k).\end{aligned}\quad (2.12)$$

Диагностическую модель данного типа назовем MS-моделью. Особенности этой модели являются отсутствие инерционных свойств и независимость ее выходного сигнала от начальных условий объекта диагностирования. MS-модель, как следует из уравнений (2.12), описывается в

классе линейных конечно-разностных уравнений с переменными коэффициентами.

Метод построения диагностических моделей с произвольной динамикой.

Рассмотренный ранее метод аналитической линеаризации позволяет получить диагностические модели, динамические свойства которых определяются собственными значениями матрицы A . Чем меньше собственное значение, тем более инерционен объект диагностирования, а значит, тем больше необходимо времени для формирования косвенного признака $\Delta y(k)$, не зависящего от начальных условий $\tilde{x}_0$. Для построения диагностических моделей, динамика которых может выбираться по желанию проектировщика, используем для воспроизведения номинального движения наблюдатель Люенбергера [146] в такой форме:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= G \hat{x}(k) + K \tilde{y}(k) + B u(k); \hat{x}(k_0) = 0; \\ \hat{y}(k) &= C \hat{x}(k),\end{aligned}\quad (2.13)$$

где матрица $G = A - KC$. Для "малых" отказов матрицы уравнений возмущенного движения (2.9) можно представить следующим образом:

$$A(\lambda) = A + A_i \Delta \lambda_i; B(\lambda) = B + B_i \Delta \lambda_i. \quad (2.14)$$

Вычитая из уравнений возмущенного движения (2.9) соответствующие уравнения наблюдателя Люенбергера с учетом представления (2.14) и в результате соответствующих преобразований, получим уравнения

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= G \Delta x(k) + A_i \hat{x}(k) \Delta \lambda_i + B_i u(k) \Delta \lambda_i; \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k),\end{aligned}\quad (2.15)$$

описывающие диагностическую модель с произвольной динамикой, которую будем называть ML-моделью.

Если уравнения возмущенного движения представлены не в канонической форме, а в общем виде

$$\begin{aligned}\tilde{x}(k+1) &= A(\lambda) \tilde{x}(k) + B(\lambda) u(k); \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= C(\lambda) \tilde{x}(k),\end{aligned}\quad (2.16)$$

то такому описанию соответствует ML-модель следующей структуры:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= G\Delta x(k) + (A_i - KC_i)\tilde{x}(k)\Delta\lambda_i + B_i u(k)\Delta\lambda_i; \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \Delta y(k) &= C\Delta x(k) + C_i\tilde{x}(k)\Delta\lambda_i.\end{aligned}\quad (2.17)$$

Сравнение моделей (2.15) и (2.17) показывает, что структура второй модели сложнее. Очевидно, что на структуру ML-моделей существенное влияние оказывает выбор базиса описания возмущенного движения. Наиболее целесообразны базисы, обеспечивающие получение наблюдаемых канонических форм.

В приведенных уравнениях динамика определяется собственными числами матрицы G . Если выбрать матрицу G в форме $G = \sigma I$, где σ – скалярная величина собственного значения; I – $(n \times n)$ -мерная единичная матрица, то, выбирая σ из условия $|\sigma| < 1$, можно обеспечить любую желаемую динамику ML-модели. При таком выборе матрицы G и при отсутствии отказов $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta y(k) = 0$, а время переходного процесса определяется величиной σ .

Матрицу K наблюдателя (2.13) находят из соотношения $G = A - KC$.

Изложенные методы позволяют на основании уравнений возмущенного движения СУ построить различные типы диагностических моделей, различающихся структурой и свойствами.

2.2.2. Диагностические модели для "больших" отказов

В ряде практических задач предположение о "малости" признака отказа оказывается неправомерным, поэтому рассмотренные MD-, MS- и ML-модели не позволят адекватно описать возможные технические состояния СУ. Проанализируем методы построения диагностических моделей для систем, подверженных действию отказов, характеризующихся значительными изменениями признаков $\Delta\lambda_i$.

Метод аналитической линеаризации. Рассмотрим уравнения возмущенного движения СУ при отсутствии ошибок и помех, так как их учет только усложнит выкладки при изложении методов, принципиально не поменяв сути получаемых диагностических моделей. Более того, векторы $\xi(k)$ и $v(k)$ в

уравнениях (2.2) используются для отражения факта "размытости" сигналов в СУ, поэтому их характеристики не оговаривались. При практическом использовании полученных для точных измерений диагностических моделей необходимо учитывать размытость их сигналов с помощью аддитивных векторов с соответствующими реальным условиям диапазонами изменений. Итак, возмущенное движение СУ описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\tilde{x}(k+1) &= A(\lambda)\tilde{x}(k) + B(\lambda)u(k); \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= C(\lambda)\tilde{x}(k) + D(\lambda)u(k) + F(\lambda).\end{aligned}\quad (2.18)$$

При больших отклонениях прямых диагностических параметров λ_i от своих номинальных значений матрицы возмущенного движения для i -го параметра представим в виде

$$\begin{aligned}A(\lambda) &= A + \Delta A(\Delta\lambda_i); B(\lambda) = B + \Delta B(\Delta\lambda_i); C(\lambda) = C + \Delta C(\Delta\lambda_i); \\ D(\lambda) &= D + \Delta D(\Delta\lambda_i); F(\lambda) = F + \Delta F(\Delta\lambda_i).\end{aligned}$$

Тогда уравнение возмущенного движения системы таково:

$$\begin{aligned}\tilde{x}(k+1) &= [A + \Delta A(\Delta\lambda_i)]\tilde{x}(k) + [B + \Delta B(\Delta\lambda_i)]u(k); \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= [C + \Delta C(\Delta\lambda_i)]\tilde{x}(k) + [D + \Delta D(\Delta\lambda_i)]u(k) + F + \Delta F(\Delta\lambda_i).\end{aligned}\quad (2.19)$$

Для описания номинального поведения объекта диагностирования применяется следующая эталонная модель:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k); x(k_0) = 0; \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + F.\end{aligned}\quad (2.20)$$

Если в качестве прямых признаков отказов использовать отклонения матриц $\Delta A(\Delta\lambda_i)$, $\Delta B(\Delta\lambda_i)$, $\Delta C(\Delta\lambda_i)$, $\Delta D(\Delta\lambda_i)$ и $\Delta F(\Delta\lambda_i)$, то, вычитая почленно из уравнения (2.19) эталонную модель (2.20), получим:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= A\Delta x(k) + \Delta A(\Delta\lambda_i)\tilde{x}(k) + \Delta B(\Delta\lambda_i)u(k); \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \Delta y(k) &= C\Delta x(k) + \Delta C(\Delta\lambda_i)\tilde{x}(k) + \Delta D(\Delta\lambda_i)u(k) + \Delta F(\Delta\lambda_i).\end{aligned}\quad (2.21)$$

Данные уравнения описывают диагностическую модель, которую будем называть BD-моделью. Очевидно, что динамика BD-модели определяется собственными числами матрицы A .

Отметим, что при "малых" отказах, т.е. когда $\Delta\lambda_i \gg \Delta\lambda_i^2$, приращение матриц представимо таким образом:

$$\begin{aligned}\Delta A(\Delta\lambda_i) &= A_i \Delta\lambda_i; \Delta B(\Delta\lambda_i) = B_i \Delta\lambda_i; \Delta C(\Delta\lambda_i) = C_i \Delta\lambda_i; \\ \Delta D(\Delta\lambda_i) &= D_i \Delta\lambda_i; \Delta F(\Delta\lambda_i) = F_i \Delta\lambda_i.\end{aligned}\quad (2.22)$$

Тогда после преобразования уравнений (2.21) получим модель

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= A \Delta x(k) + A_i x(k) \Delta\lambda_i + B_i u(k) \Delta\lambda_i; \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k) + C \tilde{x}(k) \Delta\lambda_i + D u(k) \Delta\lambda_i + F_i \Delta\lambda_i,\end{aligned}$$

которая соответствует MD-модели (2.6). Следовательно, BD-модель является более общей по отношению к MD-модели. Следует отметить, что при линейной зависимости коэффициентов матриц $A(\lambda)$, $B(\lambda)$, $C(\lambda)$, $D(\lambda)$ и $F(\lambda)$ от прямых диагностических параметров отказа λ_i MD- и BD-модели совпадают.

Метод построения статических диагностических моделей. Если объект диагностирования для диагностического параметра λ_i описывается такими уравнениями возмущенного движения, как

$$\begin{aligned}\tilde{x}(k+1) &= A(\Delta\lambda_i) \tilde{x}(k) + B(\Delta\lambda_i) u(k); \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= C \tilde{x}(k),\end{aligned}\quad (2.23)$$

а статическая эталонная модель имеет вид

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= A \hat{x}(k) + B u(k); \hat{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \hat{y}(k) &= C \hat{x}(k),\end{aligned}\quad (2.24)$$

то, вычитая из уравнений (2.23) соответствующие уравнения (2.24), получим

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= \Delta A(\Delta\lambda_i) \tilde{x}(k) + \Delta B(\Delta\lambda_i) u(k); \Delta x(k_0) = 0; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k).\end{aligned}\quad (2.25)$$

Система уравнений (2.25) представляет собой статическую диагностическую модель для "больших" отказов. Модели такой структуры будем называть BS-моделями. При "малых" $\Delta\lambda_i$ уравнения BS-модели (2.25) эквивалентны уравнениям (2.12) MS-модели. Косвенный диагностический признак $\Delta y(k)$ в BS-модели не зависит от начальных условий объекта, т.е. содержит только информацию о реакции технического состояния,

характеризуемого параметром отказа λ_i , на управляющее воздействие $u(k)$. BS- и MS-модели совпадают при линейной зависимости коэффициентов матриц отклонений от параметра λ_i .

Метод построения диагностических моделей с произвольной динамикой.

Метод основан на определении относительного движения возмущенной отказом системы, представленной в канонической наблюдаемой форме

$$\begin{aligned}\tilde{x}(k+1) &= [A + \Delta A(\Delta\lambda_i)] \tilde{x}(k) + [B + \Delta B(\Delta\lambda_i)] u(k); \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= C \tilde{x}(k),\end{aligned}\quad (2.26)$$

при использовании в качестве модели, воспроизводящей опорную траекторию, наблюдателя Льюенбергера:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= G \hat{x}(k) + K \tilde{y}(k) + B u(k); \hat{x}(k_0) = 0; \\ \hat{y}(k) &= C \hat{x}(k).\end{aligned}$$

Тогда относительное движение описывается такой системой:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= G \Delta x(k) + \Delta A(\Delta\lambda_i) \tilde{x}(k) + \Delta B(\Delta\lambda_i) u(k); \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k).\end{aligned}\quad (2.27)$$

Динамика полученной системы уравнений определяется собственными числами матрицы G , которые выбираются разработчиком в целях обеспечения требуемого времени переходного процесса. Такие диагностические модели с произвольной динамикой назовем BL-моделями. Рекомендации по выбору матрицы G и определения матрицы K , приведенные для ML-моделей, справедливы и для BL-моделей.

Рассмотрим на примере применение описанных методов при построении иерархии диагностических моделей.

Пример 2.1. В качестве объекта диагностирования исследуем пневматический сервопривод, представленный функциональной схемой на рис. 2.2 и состоящий из суммирующего усилителя мощности (УМ), рулевой машинки (РМ) и потенциометра (П) в обратной связи. При отсутствии отказов сервопривод представим с помощью структурной схемы (рис. 2.3), где k_1, k_2 – коэффициенты усиления УМ соответственно по $u_3(t)$ и $u_{\Pi}(t)$; k_{PM} и T_{PM} –

соответственно коэффициент передачи и постоянная времени РМ; k_{Π} – коэффициент передачи потенциометра; s – комплексная переменная преобразований Лапласа.

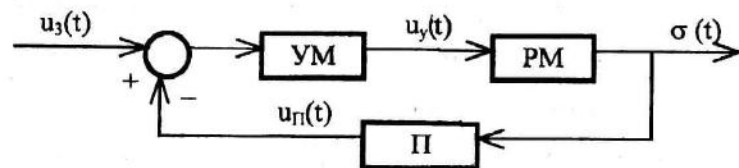


Рис.2.2. Функциональная схема пневматического сервопривода

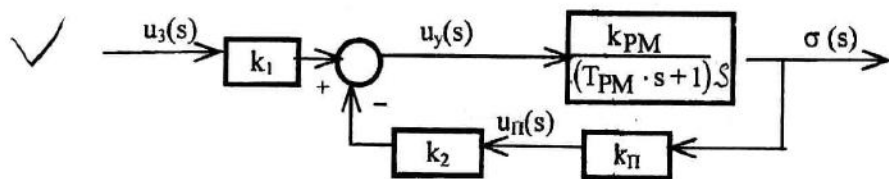


Рис. 2.3. Структурная схема сервопривода

В целях построения ДФМ для определения вида отказа рассмотрим такой функциональный элемент, как УМ, и часть системы РМ+П. Итак, УМ реализуется на операционном усилителе с двумя входами (рис. 2.4). Из опыта эксплуатации таких усилителей следует, что наиболее вероятными однократными отказами являются: d_1 – дрейф нуля; d_2 – уменьшение чувствительности по $u_3(t)$; d_3 – уменьшение чувствительности по $u_{\Pi}(t)$; d_4 – уменьшение общей чувствительности по двум входам; d_5 – прогорание операционного усилителя; d_6 – обрыв по входу $u_3(t)$; d_7 – обрыв по входу $u_{\Pi}(t)$; d_8 – обрыв по входу $u_y(t)$. Таким образом, подмножество видов отказов состоит из $D_1 = \{d_1, d_2, \dots, d_8\}$.

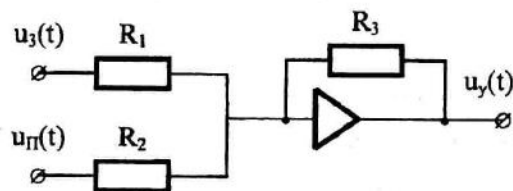


Рис. 2.4. Схема УМ на операционном усилителе

Произведем параметризацию элементов подмножества D_1 . Для элемента d_1 введем параметр u_{y0} , для d_2 – k_1 , для d_3 – k_3 , для d_4 – k_3 . Прогорание операционного усилителя можно характеризовать условием $|u_y(t)| \geq 10$ и $u_y(t) \approx \text{const}, \forall t \in T$, элемент d_5 – $k_1 \approx 0, \forall u_3(t) \neq 0$, элемент d_7 – $k_2 \approx 0, \forall u_{\Pi}(t) \neq 0$ и элемент d_8 – $u_y(t) \approx 0, \forall u_3(t) \neq 0$ и $\forall u_{\Pi}(t) \neq 0$.

Уравнение возмущенного движения для элемента d_1 имеет в конечно-разностной форме такой вид:

$$\tilde{u}_y(k) = [k_{1H} - k_{2H}] \begin{bmatrix} u_3(k) \\ u_{\Pi}(k) \end{bmatrix} + u_{y0}, \quad (2.28)$$

где k_{1H}, k_{2H} – номинальные значения параметров. Используя метод построения MD-моделей при условии, что $x(k) = 0, \forall k$, получим

$$\Delta u_y(k) = u_{y0}. \quad (2.29)$$

Аналогичным образом строятся MD-модели для элементов d_2, d_3 и d_4 . Так, для вида отказа d_2 MD-модель описывается уравнением

$$\Delta u_y(k) = \Delta k_1 u_3(k). \quad (2.30)$$

Диагностические модели для остальных элементов подмножества D_1 могут быть построены в терминах параметров k_1, k_2 и k_3 . Так, признаком обрыва по входу $u_3(t)$ является $\Delta k_1 = -k_{1H}$, и тогда диагностическая модель для этого случая принимает вид

$$\Delta u_y(k) = -k_{1H} u_3(k). \quad (2.31)$$

При решении задачи определения видов отказа иногда оказывается целесообразным использовать не ДФМ, а ДЛМ, для которых параметризация в форме условий, таких, как для элементов $d_5 \dots d_7$, является более приемлемой.

РМ совместно с П обычно представляет собой конструктивно законченный блок, для которого наиболее характерны следующие виды отказов: d_1 – уменьшение эффективности РМ из-за засорения воздухопроводов; d_2 –

смещение нуля П; d_3 – уменьшение чувствительности П; d_4 – обрыв положительного питающего провода П; d_5 – обрыв отрицательного питающего провода П; d_6 – обрыв сигнального провода П. Итак, подмножество $D_2 = \{d_1, d_2, \dots, d_6\}$.

Исследование свойств РМ при засорениях воздухопроводов позволило выявить влияние этого вида отказа на постоянную времени T_{PM} , которую выберем в качестве прямого диагностического параметра. Математическая модель возмущенного движения РМ+П в этом случае описывается в канонической наблюдаемой форме такими уравнениями:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k+1) \\ \tilde{x}_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 - \frac{T_0}{T_{PM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_0 k_{PM}}{T_{PM}} \end{bmatrix} u_y(k); \quad (2.32)$$

$$\tilde{u}_\Pi(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix},$$

где T_0 – период квантования АЦП; знак тильда "˜" используется для обозначения диагностического параметра, тогда как другие параметры считаются номинальными.

Диагностическая ML-модель для признака отказа ΔT_{PM} описывается следующими уравнениями:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1(k+1) \\ \Delta x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma & 0 \\ 0 & \sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{T_0}{T_{PM}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix} \Delta T_{PM} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_0 k_{PM}}{T_{PM}^2} \end{bmatrix} u_y(k) \Delta T_{PM}; \quad (2.33)$$

$$\Delta u_\Pi(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix}; \quad \Delta x_1(k) = \Delta x_{10}; \Delta x_2(k) = \Delta x_{20}.$$

Диагностическая BL-модель для этого признака отказа имеет вид

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1(k+1) \\ \Delta x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma & 0 \\ 0 & \sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 - \frac{T_0}{T_{PM} + \Delta T_{PM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix} \Delta T_{PM} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_0 k_{PM}}{T_{PM} + \Delta T_{PM}} \end{bmatrix} u_y(k); \quad (2.34)$$

$$\Delta u_\Pi(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix}; \quad \Delta x_1(k) = \Delta x_{10}; \Delta x_2(k) = \Delta x_{20}.$$

Параметризация видов отказов П и построение моделей производятся так, как и для УМ.

Перейдем теперь к построению моделей для задачи установления класса. Все множество физических отказов УМ можно представить следующими четырьмя классами: 1-й класс включает в себя виды отказов d_2 и d_6 , описываемые параметром $\tilde{k}_1$; 2-й класс состоит из отказов d_3 и d_7 , характеризуемых параметром $\tilde{k}_2$; 3-й класс – отказы d_4 , d_5 и d_8 , параметр $\tilde{k}_3$; 4-й класс – отказ d_1 , параметр u_{y0} . Следовательно, $\alpha^1 = \{\tilde{k}_1, \tilde{k}_2, \tilde{k}_3, u_{y0}\}$. Математическую модель УМ в терминах этих параметров отказов запишем в форме

$$\tilde{u}_y(k) = [\tilde{k}_1 \tilde{k}_3 - \tilde{k}_2 \tilde{k}_3] \begin{bmatrix} u_3(k) \\ u_\Pi(k) \end{bmatrix} + \tilde{u}_{y0}. \quad (2.35)$$

Соответствующие этим классам BD-модели будут описываться такими уравнениями:

$$\begin{aligned} \tilde{k}_1 : \Delta u_y(k) &= k_3 u_3(k) \Delta k_1; \\ \tilde{k}_2 : \Delta u_y(k) &= -k_3 u_\Pi(k) \Delta k_2; \\ \tilde{k}_3 : \Delta u_y(k) &= [k_1 u_3(k) - k_2 u_\Pi(k)] \Delta k_3; \\ \tilde{u}_{y0} : \Delta u_y(k) &= \tilde{u}_{y0}, \end{aligned} \quad (2.36)$$

где k_1, k_2, k_3 – номинальные значения параметров, соответствующих режиму функционирования УМ без отказов.

Для РМ+П сформируем такие три класса: 1-й класс – отказы d_1 , описываемые параметром $\tilde{T}_{PM}$; 2-й класс – отказы d_3, d_4, d_5 , характеризуемые $\tilde{k}_\Pi$; 3-й класс – отказы d_2 с параметром $\tilde{u}_{y0}$. Получаем, что $\alpha = \{\tilde{T}_{PM}, \tilde{k}_\Pi, \tilde{u}_{y0}\}$. Диагностическая ML-модель для первого класса представлена уравнениями (2.33). В соответствии с предложенным методом строится ML-модель для параметров $\tilde{k}_\Pi$ и $\tilde{u}_{y0}$.

Следующий уровень иерархии диагностических моделей предназначен для задачи поиска места отказа. В рассматриваемом сервоприводе – три функциональных элемента, при отказах которых требуются соответствующие индивидуальные способы и средства восстановления их работоспособности. Поэтому множество прямых диагностических параметров β этого уровня будет состоять из элементов $\beta = \{\tilde{k}_3, \tilde{T}_{PM}, \tilde{k}_\Pi\}$. Тогда математическая модель сервопривода может быть представлена уравнениями

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k+1) \\ \tilde{x}_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ -\frac{T_0 k_2 \tilde{k}_3 \tilde{k}_\Pi k_{PM}}{\tilde{T}_{PM}} & 1 - \frac{T_0}{\tilde{T}_{PM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_3(k); \\ \begin{bmatrix} \tilde{u}_y(k) \\ \tilde{u}_\Pi(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{T_0 k_1 \tilde{k}_3^2 k_2 k_{PM} \tilde{k}_\Pi}{\tilde{T}_{PM}} & 0 \\ \frac{T_0 k_1 \tilde{k}_3 k_{PM} \tilde{k}_\Pi}{\tilde{T}_{PM}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 \tilde{k}_3 \\ 0 \end{bmatrix} u_3(k). \end{aligned} \quad (2.37)$$

Диагностическая MD-модель, описывающая влияние отказов УМ на диагностические признаки сервопривода, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k+1) \\ \Delta x_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ -\frac{T_0 k_2 k_3 k_\Pi k_{PM}}{T_{PM}} & 1 - \frac{T_0}{T_{PM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{T_0 k_2 k_\Pi k_{PM}}{T_{PM}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix} \Delta k_3; \\ \begin{bmatrix} \Delta u_y(k) \\ \Delta u_\Pi(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{T_0 k_1 k_3^2 k_2 k_{PM} k_\Pi}{\tilde{T}_{PM}} & 0 \\ \frac{T_0 k_1 k_3 k_{PM} k_\Pi}{T_{PM}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2T_0 k_1 k_3 k_2 k_{PM} k_\Pi}{T_{PM}} & 0 \\ \frac{T_0 k_1 k_{PM} k_\Pi}{T_{PM}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix} \Delta k_3 + \\ &+ \begin{bmatrix} k_1 \\ 0 \end{bmatrix} u_3(k) \Delta k_3. \end{aligned} \quad (2.83)$$

Используя тот же принцип, аналогичным образом можно выписать MD-модели для признаков ΔT_{PM} и Δk_Π .

Для построения диагностических моделей для обнаружения отказов сервопривода сформируем множество γ , состоящее из диагностических параметров, отражающих влияние всех видов отказов из множества $D = D_1 \cup D_2$ на выходной сигнал $u_\Pi(k)$. В результате анализа установлено, что $\gamma = \{\tilde{k}_c\}$, где $\tilde{k}_c = \tilde{k}_3 \tilde{k}_{PM} \tilde{k}_\Pi$. Математическая модель всего сервопривода в канонической наблюдаемой форме описывается такими уравнениями:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k+1) \\ \tilde{x}_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ -\frac{T_0 k_2 \tilde{k}_c}{T_{PM}} & 1 - \frac{T_0}{T_{PM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_0 k_1 \tilde{k}_c}{T_{PM}} \end{bmatrix} u_3(k); \\ \tilde{u}_\Pi(k) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

BS-модель принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k+1) \\ \Delta x_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{T_0 k_2}{T_{PM}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix} \Delta k_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_0 k_1}{T_{PM}} \end{bmatrix} u_3(k) \Delta k_3; \\ \Delta u_\Pi(k) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.40)$$

В рассмотренном примере реализованы основные положения концепции диагностических моделей применительно к ДФМ; а также построены с помощью описанных ранее методов конкретные типы диагностических моделей.

Выбор типа диагностической модели производится разработчиком, исходя из учета многих факторов, определяемых условием решаемой задачи, структурой уравнений возмущенного движения, зависимостью коэффициентов уравнений от признаков отказа, удобством дальнейшего использования моделей и др.

2.3. Диагностические функциональные модели для СУ с гладкими нелинейностями

Рассмотрим аналитические методы получения диагностических моделей для СУ, аварийные режимы которых описываются нелинейными уравнениями вида

$$\tilde{y}(k+1) = \tilde{f}[\tilde{y}(k), u(k), \lambda]; \tilde{y}(k_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.41)$$

Здесь $\tilde{y}(k)$ – вектор доступных измерению сигналов, $\tilde{y}(k) \in Y^m$; $u(k)$ – вектор управляющих воздействий, $u(k) \in U^r$; $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_\mu\}$ – вектор диагностических параметров отказов, $\lambda_i \in \Omega_i$, где Ω_i – область возможных значений параметра λ_i ; $\tilde{f}[\cdot]$ – векторная аналитическая по $\tilde{y}(k)$ и λ нелинейная функция.

Для данного класса нелинейных систем используем такие же по сути методы аналитического построения, как и для класса линейных систем.

Воспользуемся методом аналитической линеаризации и для малых $\Delta\lambda_i$ определим структуру диагностической модели. С этой целью разложим уравнение (2.41) в ряд Тейлора в окрестности $\lambda = \lambda_H$:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(k+1) = y(k+1) + \left. \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} \frac{\partial \tilde{y}(k)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda = \lambda_H} \Delta\lambda_i + \left. \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda = \lambda_H} \Delta\lambda_i + \\ + \frac{1}{2!} \left. \frac{\partial^2 \tilde{f}[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)^2} \frac{\partial^2 \tilde{y}(k)}{\partial \lambda_i^2} \right|_{\lambda = \lambda_H} \Delta\lambda_i^2 + \frac{1}{2!} \left. \frac{\partial^2 \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i^2} \right|_{\lambda = \lambda_H} \Delta\lambda_i^2 + \dots, \tilde{y}(k_0) = \tilde{y}_0. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Из-за малости $\Delta\lambda_i$ членами более высокого порядка малости можно пренебречь и после преобразования представить ряд в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) \approx \left. \frac{\partial f[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} \frac{\partial \tilde{y}(k)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda = \lambda_H} \Delta\lambda_i + \left. \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda = \lambda_H} \Delta\lambda_i; \\ \Delta \tilde{y}(k_0) = \tilde{y}_0. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Если частную производную $\frac{\partial \tilde{y}(k)}{\partial \lambda_i}$ записать как отношение $\frac{\Delta \tilde{y}(k)}{\Delta \lambda_i}$, что допустимо при малых величинах отклонений, то уравнение (2.43) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) = \left. \frac{\partial f[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} \right|_{\lambda = \lambda_H} \tilde{y}(k) = y(k) \Delta y(k) - \left. \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda = \lambda_H} \tilde{y}(k) = y(k) \Delta\lambda_i; \\ \Delta y(k_0) = \tilde{y}_0. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Записанное уравнение представляет собой динамическую диагностическую модель для "малых" отказов, которую назовем MDN-моделью. Первое слагаемое, получаемое в результате линеаризации нелинейной функции $\tilde{f}[\cdot]$ по переменной $\tilde{y}(k)$, является, по сути, матрицей с постоянными коэффициентами, собственные значения которой определяют динамику системы и MDN-модели. Выходной сигнал модели $\Delta y(k)$ зависит от начальных условий и рабочей точки системы.

Для исключения влияния начальных условий на выходной сигнал диагностической модели воспользуемся методом, основанным на применении статических эталонных моделей, описываемых уравнением

$$\hat{y}(k+1) = f[\hat{y}(k), u(k), \lambda]; \hat{y}(k_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.45)$$

Если вычесть из уравнения возмущенного движения для i -го параметра уравнение эталонной модели (2.45), и полученное выражение разложить затем в ряд Тейлора относительно λ_H , ограничившись членами первого порядка, то

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) = & \tilde{f}[\tilde{y}(k), u(k), \lambda_i] - \tilde{f}[\tilde{y}(k), u(k), \lambda_H] \approx \tilde{f}[y(k), u(k), \lambda_H] + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} \frac{\partial \tilde{y}(k)}{\partial \lambda_i} \bigg|_{\lambda_H} y(k) \Delta \lambda_i + \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \bigg|_{\lambda_H} y(k) \Delta \lambda_i - f[y(k), u(k), \lambda_H] - \\ & - \frac{\partial f[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} \frac{\partial \tilde{y}(k)}{\partial \lambda_i} \bigg|_{\lambda_H} y(k) \Delta \lambda_i. \end{aligned}$$

Эталонная модель выбирается из условия, чтобы $\tilde{f}[y(k), u(k), \lambda_H] = f[y(k), u(k), \lambda_H]$. Поскольку зависимость $\tilde{f}[\cdot]$ и $f[\cdot]$ от $\tilde{y}(k)$ одна и та же, то второе и пятое слагаемые разложения будут равны. После сокращения получим уравнение

$$\Delta y(k+1) = \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \bigg|_{\lambda_H} y(k) \Delta \lambda_i; \Delta y(k_0) = 0, \quad (2.46)$$

описывающее статическую диагностическую модель для "малых" отказов – MSN-модель.

Для уменьшения влияния динамики системы на диагностический признак $\Delta y(k)$ используем для получения оценки вектора доступных измерений нелинейный наблюдатель Люенбергера [136] в такой форме:

$$\hat{y}(k+1) = f[\hat{y}(k), u(k), \lambda_H] + k[\hat{y}(k), u(k), \lambda_H] [\tilde{y}(k) - \hat{y}(k)]; \hat{y}(k_0) = 0, \quad (2.47)$$

где $\hat{y}(k)$ – m -мерная оценка вектора доступных измерений; $k[\cdot]$ – $(m \times m)$ -мерная матрица усиления обратной связи наблюдателя. Во многих практических случаях удовлетворительные результаты могут быть получены заменой зависящей от времени матрицы постоянной матрицей усиления.

С использованием нелинейного наблюдателя Люенбергера для воспроизведения опорного, базового движения системы относительное возмущенное движение для i -го признака отказа в первом приближении выражается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) = & \left[\frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} \bigg|_{\tilde{y}(k)=y(k)} - k \right] \Delta y(k) + \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \bigg|_{\lambda=\lambda_H} y(k) \Delta \lambda_i; \\ \Delta y(k_0) = & \tilde{y}_0. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Приведенное уравнение описывает нелинейную диагностическую модель с управляемой динамикой для "малых" отказов. Такую модель будем называть MLN-моделью. Матрица при $\Delta y(k)$ определяет динамику диагностической модели и может выбираться по желанию разработчика.

Отметим, что MLN-модель является более общим описанием диагностических моделей нелинейных систем, так как MDN-модель (2.44) получается из модели (2.48) выбором $k=0$, а MSN-модель (2.46) – при

$$k = \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} \bigg|_{\tilde{y}(k)=y(k), \lambda=\lambda_H}.$$

Рассмотренные три типа диагностических моделей нелинейных систем справедливы только для "малых" отказов, характеризующихся малыми численными значениями признаков отказов: $\Delta \lambda_i \gg \Delta \lambda_i^2$. Методика построения для "больших" отказов диагностических моделей динамических типа BDN, статических типа BSN и с управляемой динамикой – BLN-моделей в принципе такая же, как и при построении моделей линейных систем. Вместе с тем записать конструктивные аналитические выражения для различных типов моделей не представляется возможным из-за большой общности описания (2.41), так как структура уравнений моделей зависит от конкретного вида $\tilde{f}[\cdot]$. Следует также отметить, что если некоторые диагностические параметры λ_i

входят линейно в функцию $\tilde{f}[\cdot]$, то диагностические модели для "больших" и "малых" отказов будут эквивалентными.

Пример 2.2. Используем для иллюстрации методов получения диагностических моделей нелинейных систем трехбаковый объект управления, заимствованный из работы [140]. На рис.2.5 показана схема объекта, состоящего из трех последовательно соединенных баков с площадями поперечного сечения Q_1, Q_2 и Q_3 .

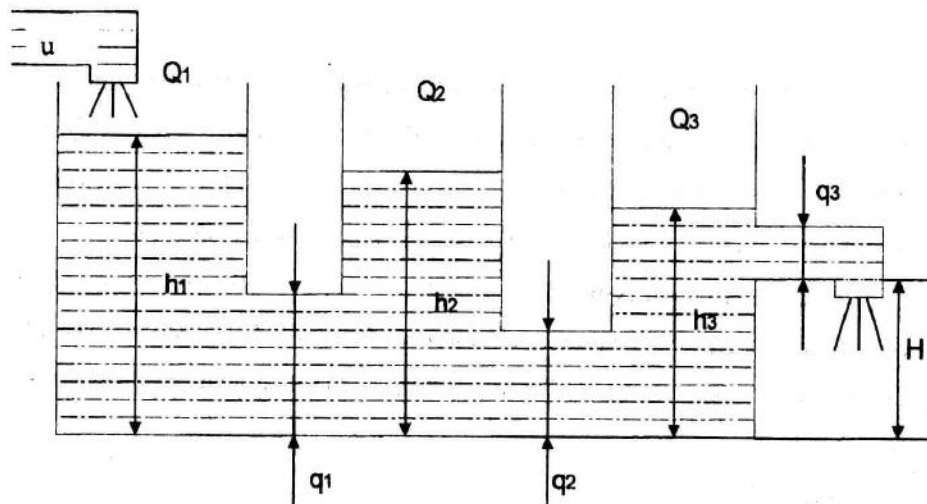


Рис. 2.5. Схема трехбакового объекта

В первый бак поступает жидкость со скоростью $u(k)$, а с третьего – на высоте N через трубу с поперечным сечением q_3 вытекает. Баки соединены между собой трубами с площадями поперечного сечения q_1, q_2 . Уровни жидкости в баках соответственно равны h_1, h_2 и h_3 . В объекте возможны следующие виды отказов: пробойны в баках, засорение соединительных и выпускной труб. Для характеристики пробойн в баках выберем диагностические параметры: δ_i – площадь поперечного сечения, h_i – высота пробойны относительно базового уровня, $i = \overline{1,3}$. Засорение труб влияет на такой параметр, как q_i , $i = \overline{1,3}$.

Рассмотрим получение диагностических моделей для первого уровня иерархии, обеспечивающего задачу определения вида отказа.

Отбросив второстепенные, несущественные факторы процесса поведения жидкости в баках (влияние температуры, давления, формы сосудов и каналов, скорости истечения и т.п.), опишем только существенные стороны процесса при возможных отказах. Для этого воспользуемся формулой скорости истечения жидкости из сосуда в виде $V = \sqrt{2gh}$, где g – ускорение свободного падения; h – высота столба жидкости, и уравнением потока (уравнением непрерывности) [76]. С учетом этих соотношений и в терминах принятых обозначений получим после преобразований следующую систему нелинейных уравнений, описывающих процесс изменения уровней жидкости в баках для заданных отказов при условии надежного измерения выходных переменных:

$$\begin{cases} \tilde{h}_1(k+1) = \tilde{h}_1(k) - \frac{T_0 q_1}{Q_1} \sqrt{2g[\tilde{h}_1(k) - \tilde{h}_2(k)]} - \frac{T_0 \delta_1}{Q_1} \sqrt{2g[\tilde{h}_1(k) - h_1]} - \frac{T_0}{Q_1} u(k); \\ \tilde{h}_2(k+1) = \tilde{h}_2(k) - \frac{T_0 q_1}{Q_2} \sqrt{2g[\tilde{h}_1(k) - \tilde{h}_2(k)]} - \frac{T_0 q_2}{Q_2} \sqrt{2g[\tilde{h}_2(k) - \tilde{h}_3(k)]} - \frac{T_0 \delta_2}{Q_2} \sqrt{2g[\tilde{h}_2(k) - h_2]}; \\ \tilde{h}_3(k+1) = \tilde{h}_3(k) - \frac{T_0 q_2}{Q_3} \sqrt{2g[\tilde{h}_2(k) - \tilde{h}_3(k)]} - \frac{T_0 q_3}{Q_3} \sqrt{2g[\tilde{h}_3(k) - H]} - \frac{T_0 \delta_3}{Q_3} \sqrt{2g[\tilde{h}_3(k) - h_3]}; \\ \tilde{h}_1(k_0) = \tilde{h}_{10}; \tilde{h}_2(k_0) = \tilde{h}_{20}; \tilde{h}_3(k_0) = \tilde{h}_{30}. \end{cases} \quad (2.49)$$

Возьмем третье уравнение системы для $h_3(k)$ и на его примере получим возможные диагностические модели для параметров g_3, δ_3 и h_3' . Используя базовое уравнение (2.44), построим MDN-модель для q_3 :

$$\begin{aligned} \Delta h_3(k+1) &= \frac{T_0 q_2 g}{Q_3 \sqrt{2g[h_2(k) - h_3(k)]}} \Delta h_2(k) - \\ &- \left[1 - \frac{T_0 q_2 g}{Q_3 \sqrt{2g[h_2(k) - h_3(k)]}} - \frac{T_0 q_3 g}{Q_3 \sqrt{2g[h_3(k) - H]}} \right] \Delta h_3(k) - \\ &- \frac{\Delta q_3}{Q_3} \sqrt{2g[h_3(k) - H]}; \Delta h_{20}, \Delta h_{30}. \end{aligned} \quad (2.50)$$

В этом и последующих уравнениях значения параметров отказов номинальные.

Для пробоины в третьем баке MDN-модель для параметра δ_3 имеет вид

$$\Delta h_3(k+1) = \frac{T_0 q_2 g}{Q_3 \sqrt{2g[h_2(k) - h_3(k)]}} \Delta h_2(k) - \left[1 - \frac{T_0 q_2 g}{Q_3 \sqrt{2g[h_2(k) - h_3(k)]}} - \frac{T_0 q_3 g}{Q_3 \sqrt{2g[h_3(k) - H]}} \right] \Delta h_3(k) - \frac{\Delta \delta_3}{Q_3} \sqrt{2g h_3(k)}; \Delta h_{20}, \Delta h_{30}. \quad (2.51)$$

В приведенной модели отсутствует признак вида отказа Δh_3 . Это связано со следующим обстоятельством. MDN-модель справедлива для малых отклонений признаков отказов $\Delta \delta_3$ и $\Delta h'_3$ относительно своих номинальных значений, а δ_{3H} и h'_{3H} равны нулю, поэтому данная модель справедлива только для пробоин в днище третьего бака. Для описания пробоин на стенках бака MDN-модель не применима, а также не применимы другие типы моделей для "малых" отказов.

Для построения MLN-модели определим матрицу типа $\frac{\partial f[\cdot]}{\partial y(k)}$ системы

(2.49), обозначив ее как A . Тогда

$$A = \begin{bmatrix} \frac{q_1 g T_0}{Q_1 \sqrt{2g[h_1(k) - h_2(k)]}} & \frac{q_1 g T_0}{Q_1 \sqrt{2g[h_1(k) - h_2(k)]}} & 0 \\ \frac{q_1 g T_0}{Q_2 \sqrt{2g[h_1(k) - h_2(k)]}} & 1 - \frac{q_1 g T_0}{Q_2 \sqrt{2g[h_1(k) - h_2(k)]}} - \frac{q_2 g T_0}{Q_2 \sqrt{2g[h_2(k) - h_3(k)]}} & \frac{q_2 g T_0}{Q_2 \sqrt{2g[h_2(k) - h_3(k)]}} \\ 0 & \frac{q_2 g T_0}{Q_3 \sqrt{2g[h_2(k) - h_3(k)]}} & 1 - \frac{q_2 g T_0}{Q_3 \sqrt{2g[h_2(k) - h_3(k)]}} - \frac{q_3 g T_0}{Q_3 \sqrt{2g[h_3(k) - H]}} \end{bmatrix}$$

Определить матрицу динамики уравнения (2.48) можно в диагональной форме, обозначив ее как $G = \sigma I$. Выбрав необходимую динамику с помощью величины σ , можно вычислить и матрицу наблюдателя K . Согласно базовому уравнению (2.48) запишем уравнение для переменной $h_3(k)$ при отказах, связанных с изменением сечения выпускающей трубы и с пробоиной в днище:

$$q_3 : \Delta h_3(k+1) = \sigma \Delta h_3(k) - \frac{T_0 \Delta q_3}{Q_3} \sqrt{2g[h_3(k) - H]}; \Delta h_{30};$$

$$\delta_3 : \Delta h_3(k+1) = \sigma \Delta h_3(k) - \frac{T_0 \Delta \delta_3}{Q_3} \sqrt{2g h_3(k)}; \Delta h_{30}. \quad (2.52)$$

Если выбрать уравнение эталонной модели для третьего уравнения системы (2.49) в виде

$$h_3(k+1) = h_3(k) + \frac{T_0 q_2}{Q_3} \sqrt{2g[\tilde{h}_2(k) - \tilde{h}_3(k)]} - \frac{T_0 q_3}{Q_3} \sqrt{2g[\tilde{h}_3(k) - H]},$$

то диагностические модели типа MSN для признаков отказов q_3 и δ_3 согласно уравнению (2.46) можно представить так:

$$q_3 : \Delta h_3(k+1) = - \frac{T_0 \Delta q_3}{Q_3} \sqrt{2g[h_3(k) - H]}; \Delta h_{30};$$

$$\delta_3 : \Delta h_3(k+1) = - \frac{T_0 \Delta \delta_3}{Q_3} \sqrt{2g h_3(k)}; \Delta h_{30}. \quad (2.53)$$

Сформируем диагностические модели для "больших" отказов, характеризующихся параметрами q_1, δ_1 и h'_1 . Для получения BDN-модели используем для диагностического признака $\Delta h_1(k)$ эталонную модель

$$h_1(k+1) = h_1(k) - \frac{T_0 q_1}{Q_1} \sqrt{2g[h_1(k) - h_2(k)]} + \frac{T_0}{Q_1} u(k); h_1(k_0) = 0.$$

Тогда, вычитая из уравнения возмущенного движения для $\tilde{h}_1(k+1)$ уравнение для $\Delta h_1(k)$, получим для следующих признаков отказов такие модели:

$$q_1 : \Delta h_1(k+1) = \Delta h_1(k) + \frac{T_0 \Delta q_1}{Q_1} [\sqrt{2g[h_1(k) - h_2(k)]} - \sqrt{2g[\tilde{h}_1(k) - \tilde{h}_2(k)]}] - \frac{T_0 \Delta q_1}{Q_1} \sqrt{2g[h_1(k) - h_2(k)]}; \Delta h_1(k_0) = h_{10};$$

$$\delta_1, h'_1 : \Delta h_1(k+1) = \Delta h_1(k) - \frac{T_0 \Delta q_1}{Q_1} [\sqrt{2g[h_1(k) - h_2(k)]} - \sqrt{2g[\tilde{h}_1(k) - \tilde{h}_2(k)]}] - \frac{T_0 \delta_1}{Q_1} \sqrt{2g[h_1(k) - h'_1]}; \Delta h_1(k_0) = h_{10}. \quad (2.54)$$

Динамические свойства BDN-моделей определяются коэффициентом

$$\frac{T_0 q_1}{Q_1}$$

Для построения моделей с произвольной динамикой представим систему (2.49) при отсутствии отказов в сокращенной форме записи:

$$h(k+1) = A\psi(k) + bu(k); h(k_0) = h_0, \quad (2.55)$$

где $h^T(k+1) = [h_1(k+1), h_2(k+1), h_3(k+1)]$; $\psi^T(k) = [h_1(k), \sqrt{h_1(k) - h_2(k)},$

$h_2(k), \sqrt{h_2(k) - h_3(k)}, h_3(k), \sqrt{h_3(k) - H}]$; A и b – матрицы соответствующих коэффициентов. Тогда уравнение наблюдателя Люенбергера можно записать в виде

$$\begin{aligned} h(k+1) &= A\psi(k) + bu(k) - k[\tilde{\psi}(k) - \psi(k)] = [A + k]\psi(k) - k\tilde{\psi}(k) + bu(k) = \\ &= \sigma\Gamma\psi(k) - k\tilde{\psi}(k) + bu(k); \end{aligned} \quad (2.56)$$

$$h(k_0) = 0.$$

Отказы в баках приводят к изменению коэффициентов матрицы A . Представим эти изменения как $A(\lambda) = A + \Delta A(\Delta\lambda_i)$. Вычитая из уравнений возмущенного движения (2.49) в форме

$$\tilde{h}(k+1) = A(\lambda)\tilde{\phi}(k) + bu(k); \tilde{h}(k_0) = \tilde{h}_0 \quad (2.57)$$

уравнение нелинейного наблюдателя (2.56), получаем:

$$\begin{aligned} h(k+1) &= [A + \Delta A(\Delta\lambda_i)]\tilde{\phi}(k) + bu(k) - \sigma\Gamma\psi(k) + k\tilde{\psi}(k) - bu(k) = \\ &= \sigma\Gamma\psi(k) - k\tilde{\psi}(k) + bu(k) = \sigma[\tilde{\psi}(k) - \psi(k)]\Delta A(\Delta\lambda_i)\tilde{\phi}(k); \Delta h(k_0) = \tilde{h}_0. \end{aligned} \quad (2.58)$$

Вектор $\phi(k)$ – девятимерный, состоящий из компонент вектора $\tilde{\psi}(k)$ и компонент при параметрах, характеризующих пробоины в баках в уравнении (2.49). Полученное уравнение представляет собой BLN-модель, динамика которого зависит от σ и выбирается разработчиком.

При построении статических диагностических моделей для "больших" отказов используем эталонную модель

$$h(k+1) = A\tilde{\psi}(k) + bu(k); h(k_0) = \tilde{h}_0. \quad (2.59)$$

Тогда диагностическая BSN-модель в общем виде описывается уравнением

$$\Delta h(k+1) = \Delta A(\Delta\lambda_i)\tilde{\psi}(k); \Delta h(k_0) = 0. \quad (2.60)$$

Конкретно для пробоины в первом баке

$$\begin{bmatrix} \Delta h_1(k+1) \\ \Delta h_2(k+1) \\ \Delta h_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{T_0 \delta_1}{Q_1} \sqrt{2g[\tilde{h}_1(k) - h'_1]} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \Delta h(k_0) = 0, \quad (2.61)$$

а при засорении выпускной трубы

$$\begin{bmatrix} \Delta h_1(k+1) \\ \Delta h_2(k+1) \\ \Delta h_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{T_0 \Delta q_3}{Q_3} \sqrt{2g[\tilde{h}_3(k) - H]} \end{bmatrix}; \Delta h(k_0) = 0. \quad (2.62)$$

Из сравнения моделей (2.53) и (2.62) для параметра q_3 очевидно, что MSN-модель совпадает с моделью BSN в силу линейной зависимости $\tilde{f}[\cdot]$ от параметра q_3 .

Рассмотренный пример раскрывает особенности структуры диагностических моделей для СУ с гладкими нелинейностями.

2.4. Диагностические модели для СУ с существенными нелинейностями

Достаточно представительный класс СУ содержит в своем составе функциональные элементы с существенно нелинейными статическими характеристиками. В теории нелинейных систем управления широкое распространение получили методы структурных преобразований, позволяющие представить нелинейные системы в виде последовательного соединения статического элемента и линейной части, охваченных отрицательной обратной связью [12, 100, 119]. Используем такое представление для более общего случая многомерных нелинейных динамических систем с r существенными

статическими нелинейностями. На рис. 2.6 показана укрупненная функциональная схема такой системы. Выход системы обозначен вектором $y(t)$. Вектор управляющих воздействий – $u(t)$. Вектор ошибки, или отклонения – $e(t)$. Вектор сигналов управлений на линейную часть – $g(t)$.

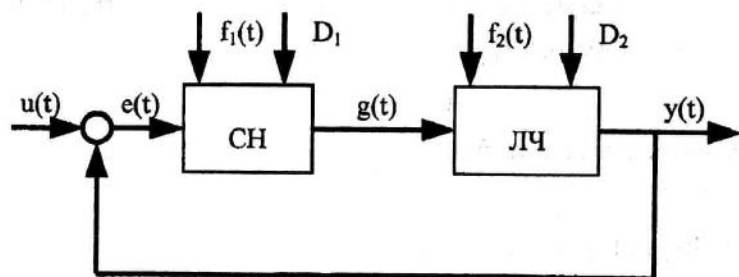


Рис.2.6. Обобщенная функциональная схема нелинейной системы с существенными нелинейностями: СН – существенные статические нелинейные элементы; ЛЧ – линейная часть системы

Для данного класса нелинейных СУ построение диагностических моделей ранее описанными методами не представляется возможным в силу недифференцируемости в обычном смысле уравнений существенных статических нелинейностей, зависимости свойств нелинейных систем от величин управляющих воздействий, а также из-за трудностей получения аналитического описания систем. Исходное описание этого класса нелинейных СУ будем рассматривать с использованием непрерывных функций времени в силу развитости математических средств описания и анализа непрерывных процессов.

Исследование свойств нелинейных систем как объектов диагностирования позволило выявить характерную особенность, которую сформулируем с помощью следующего утверждения.

Утверждение 2.1. Техническое состояние замкнутой динамической системы с существенными статическими нелинейностями однозначно определяется техническим состоянием последовательного соединения существенных нелинейностей и линейной части системы.

Использование этого утверждения позволяет перейти от исследования свойств замкнутой нелинейной системы к исследованию ее свойств в разомкнутом состоянии. Представим обобщенную функциональную схему разомкнутой нелинейной системы в виде, показанном на рис.2.7. При таком представлении все существенные нелинейные свойства системы характеризуются нелинейными элементами НЭ_i, $i = \overline{1, r}$, а другие свойства системы отражаются в линейной части.



Рис.2.7. Обобщенная функциональная схема разомкнутой нелинейной системы: НЭ_i, $i = \overline{1, r}$ – существенно нелинейные статические элементы

Рассмотрим два принципиально возможных подхода к построению диагностических моделей разомкнутой нелинейной системы. Первый заключается в использовании математического описания во временной области в форме Коши. В основе второго подхода лежит применение интегрального преобразования Лапласа в целях получения моделей в области комплексной переменной s .

2.4.1. Диагностические модели во временной области

Разомкнутая нелинейная система (см. рис. 2.7) при действии отказов описывается в форме Коши таким векторным уравнением возмущенного движения:

$$\dot{\tilde{y}}(t) = A(\lambda)\tilde{y}(t) + B(\lambda)F[\lambda, u(t)]; \tilde{y}(t_0) = \tilde{y}_0, \quad (2.63)$$

где $\tilde{y}(t)$ – вектор измеряемых переменных возмущенного движения, $\tilde{y}(t) \in Y^n$; $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$ – матрицы соответствующих размерностей, характеризующие линейную часть системы; λ – μ -мерный вектор диагностических параметров отказов; $F[\lambda, u(t)]$ – r -мерная векторная функция, описывающая существенные статические нелинейности системы.

При построении ранее описанных диагностических моделей применялся принцип относительности, состоящий в рассмотрении движения возмущенной системы относительно движения, характеризующего ее эталонное, номинальное или оценочное поведение. Используем этот принцип для систем, описываемых уравнением (2.63). Рассмотрим вначале методы построения диагностических моделей для "больших" отказов.

Метод аналитической линеаризации. Предполагая независимость отказов, проанализируем отдельно диагностические модели для отказов линейной части и нелинейных элементов.

а) Отказ, характеризующийся параметром λ_i , приводит к изменению коэффициентов матриц уравнения (2.63). Эти изменения представим следующим образом: $A(\lambda_i) = A + \Delta A(\Delta\lambda_i)$, $B(\lambda_i) = B + \Delta B(\Delta\lambda_i)$. Номинальное движение системы описывается с помощью эталонной модели вида:

$$\dot{\hat{y}}(t) = A\hat{y}(t) + BF[\lambda_H, u(t)]; y(t_0) = 0. \quad (2.64)$$

Вычитая из уравнения (2.63) уравнение эталонной модели получим

$$\Delta\dot{y}(t) = A\Delta y(t) + \Delta A(\Delta\lambda_i)\tilde{y}(t) + \Delta B(\Delta\lambda_i)F[\lambda_H, u(t)]; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.65)$$

Это уравнение описывает связь диагностических признаков системы с такими признаками отказов, как $\Delta A(\Delta\lambda_i)$ и $\Delta B(\Delta\lambda_i)$.

б) Отказ λ_i приводит к изменению характеристики вектора $F[\lambda, u(t)]$ так, что эти изменения можно представить выражением

$$F[\lambda, u(t)] = F[\lambda_H, u(t)] - \Delta F[\Delta\lambda_i, u(t)].$$

Уравнение дополнительного движения относительно движения, описываемого моделью (2.64), будет иметь вид:

$$\Delta\dot{y}(t) = A\Delta y(t) + B\Delta F[\Delta\lambda_i, u(t)]; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.66)$$

Полученное уравнение описывает для i -го параметра связь диагностического признака системы $\Delta y(t)$ с косвенным признаком отказа $\Delta F[\Delta\lambda_i, u(t)]$. В общем виде уравнение связи признаков отказов с признаками системы можно записать так:

$$\Delta\dot{y}(t) = A\Delta y(t) + \Delta H[\Delta\lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0, \quad (2.67)$$

где $\Delta H[\cdot]$ – слагаемое, описывающее влияние i -го признака отказа на дополнительное движение. Для случая "а" вектор $\Delta H[\cdot]$ будет иметь структуру

$$\Delta H[\cdot] = \Delta A(\Delta\lambda_i)\tilde{y}(t) + \Delta B(\Delta\lambda_i)F[\lambda, u(t)], \quad (2.68)$$

для случая "б"

$$\Delta H[\cdot] = B\Delta F[\Delta\lambda_i, u(t)]. \quad (2.69)$$

Уравнение (2.67) представляет собой диагностическую динамическую модель для "больших" отказов существенно нелинейной системы. Такую модель будем называть BDC-моделью.

Метод построения статических диагностических моделей. При этом методе построения в качестве эталонной используется модель вида

$$\dot{\hat{y}}(t) = A\hat{y}(t) + BF[\lambda_H, u(t)]; \hat{y}(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.70)$$

Рассмотрим структуру диагностических моделей для отказов, возникающих как в линейной, так и в нелинейной частях системы.

а) Действие отказа d_j , характеризующегося параметром λ_i , приводит к изменению матриц $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$, которые представим с помощью аддитивных добавок косвенных признаков отказа – $\Delta A(\Delta\lambda_i)$ и $\Delta B(\Delta\lambda_i)$. В результате вычитания из уравнения возмущенного движения уравнения эталонной модели (2.70) получим, что

$$\Delta\dot{y}(t) = \Delta A(\Delta\lambda_i)\tilde{y}(t) + \Delta B(\Delta\lambda_i)F[\lambda_H, u(t)]; \Delta y(t_0) = 0. \quad (2.71)$$

б) Если отказы возникают в нелинейной части системы, то для i -го признака отказа дополнительное движение относительно эталонного описывается следующим уравнением:

$$\Delta \dot{y}(t) = B \Delta F[\Delta \lambda_i, u(t)]; \Delta y(t_0) = 0. \quad (2.72)$$

Общее уравнение для полученных частных представим в такой форме:

$$\Delta \dot{y}(t) = \Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]; \Delta y(t_0) = 0. \quad (2.73)$$

Вектор $\Delta H[\cdot]$, как и прежде, описывается соответствующими соотношениями (2.68) и (2.69). Уравнение (2.73) представляет собой общее описание статической диагностической модели для "больших" отказов, которую будем называть BSC-моделью.

Метод построения диагностических моделей с произвольной динамикой.

В качестве эталонной модели нелинейной системы будем использовать уравнение, построенное по типу наблюдателя Люенбергера для класса линейных систем:

$$\dot{\hat{y}}(t) = G\hat{y}(t) + K\tilde{y}(t) + B F[\lambda_n, u(t)]; \hat{y}(t_0) = 0. \quad (2.74)$$

Выбирая матрицу G из условия обеспечения желаемой динамики, можно определить матрицу K из такого соотношения: $K = A + G$. Рассмотрим, как и прежде, две ситуации.

а) Отказ d_j приводит к изменению матриц $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$. Вычитание из уравнения возмущенного движения уравнения эталонного приводит к выражению

$$\Delta \dot{y}(t) = G \Delta y(t) + \Delta A(\Delta \lambda_i) \tilde{y}(t) + \Delta B(\Delta \lambda_i) F[\lambda_n, u(t)]; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.75)$$

связывающему диагностический признак системы $\Delta y(t)$ с косвенными признаками отказов $\Delta A(\Delta \lambda_i)$ и $\Delta B(\Delta \lambda_i)$.

б) При отказах нелинейных элементов системы управления уравнение дополнительного движения будет иметь вид:

$$\Delta \dot{y}(t) = G \Delta y(t) + B \Delta F[\Delta \lambda_i, u(t)]; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.76)$$

Обобщенное уравнение связи признаков отказа можно представить в такой форме:

$$\Delta \dot{y}(t) = G \Delta y(t) + \Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.77)$$

Здесь вектор $\Delta H[\cdot]$ описывается соответствующими соотношениями (2.68) и (2.69). Уравнение (2.77) представляет собой диагностическую модель с произвольной динамикой. Такую модель будем называть BLC-моделью.

Анализ структуры полученных диагностических моделей (2.67), (2.73) и (2.77) показывает, что наиболее общей формой представления является BLC-модель, так как соответствующим выбором матрицы G можно получить модели типа BDC или BSC.

В полученных диагностических моделях не "раскрыта" структура нелинейной части системы, в связи с чем эти модели не являются конструктивными для дальнейшего использования при решении задач диагностирования. В целях конкретизации этого аспекта моделирования рассмотрим широко использующийся в системах управления нелинейный элемент с трехпозиционной релейной характеристикой [118] и множеством видов физических отказов, однозначно описываемых соответствующими параметрами. В качестве управляющего воздействия будем использовать гармонический сигнал $u(t) = u_{\max} \sin \omega t$. На рис.2.8 приведены эпюры, отражающие особенности прохождения гармонического сигнала через релейный элемент.

Очевидно, что на выходе нелинейного элемента образуется последовательность разнополярных прямоугольных импульсов, которая может быть описана с помощью функций Хевисайда (единичных функций), позволяющих получить аналитическое отражение свойств нелинейных элементов во временной области [34]. Так, для рассматриваемого нелинейного элемента выходной сигнал может быть описан таким уравнением:

$$g(t) = C_1 [h(t - t_1) - h(t - t_2)] - C_2 [h(t - t_3) - h(t - t_4)]. \quad (2.78)$$

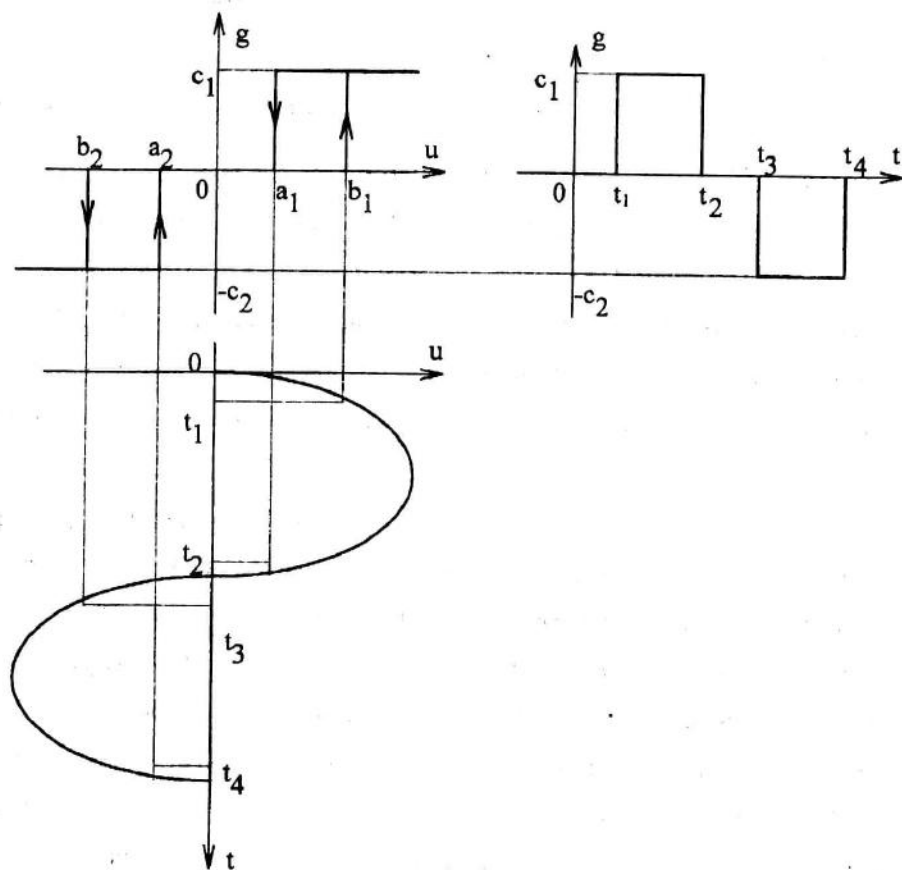


Рис.2.8. Прохождение гармонического сигнала через релейный элемент

Моменты времени t_1, t_2, t_3 и t_4 связаны с параметрами отказов $c_1, a_1, b_1, c_2, a_2, b_2$ и параметрами входного сигнала следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{b_1}{u_{\max}}; \quad t_2 = \frac{1}{\omega} (\pi - \arcsin \frac{a_1}{u_{\max}}); \\ t_3 &= \frac{1}{\omega} (\pi + \arcsin \frac{b_2}{u_{\max}}); \quad t_4 = \frac{1}{\omega} (2\pi - \arcsin \frac{a_2}{u_{\max}}). \end{aligned} \quad (2.79)$$

От выбора формы управляющего воздействия зависит сложность математического описания свойств нелинейных элементов. Рассмотрим часто используемый тестовый сигнал $u(t) = t$, который приводит к наиболее простой

форме моделей. В качестве объекта выберем элемент с дефектами зоны нечувствительности, наклона характеристики и насыщения. На рис. 2.9 представлены особенности прохождения такого тестового сигнала через нелинейный элемент и характер получаемого выходного сигнала во временной области. Используя единичные функции, выходной сигнал можно описать выражением

$$g(t) = \frac{c}{b-a} [(t-a)h(t-a) - (t-b)h(t-b)], \quad (2.80)$$

где a, b и c – параметры отказов.

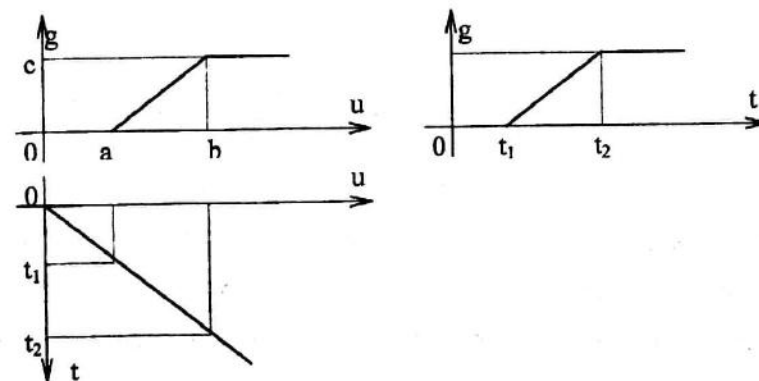


Рис.2.9. Прохождение линейно изменяющегося сигнала через нелинейный элемент

Для отражения нелинейных свойств во временной области могут быть использованы селектирующие функции, приводящие к более компактным математическим описаниям [33, 90]. Так, выражение (2.80) с помощью селектирующих функций может быть представлено в виде:

$$F[\lambda, u(t)] = \frac{c}{b-a} (t-a) \text{si}(t, a, b) + c \cdot \text{si}(t, b, \infty), \quad (2.81)$$

где $\text{si}(\cdot)$ – селектирующая функция, обладающая следующим свойством:

$$\text{si}(x, x_1, x_2) = \begin{cases} 1, & x_1 < x < x_2; \\ 0, & x < x_1, x > x_2; \\ 0.5, & x = x_1, x = x_2. \end{cases} \quad (2.82)$$

Таким образом, применение единичных и селектирующих функций позволяет произвести аналитическое описание векторной нелинейной функции $F[\lambda, u(t)]$, а следовательно, и нелинейной функции $\Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]$ в диагностических моделях различного типа.

Существуют задачи диагностирования нелинейных СУ, когда тестовый режим их функционирования практически невозможен и нецелесообразен. Рассмотрим описание свойств нелинейного элемента, изображенного на рис.2.9, с помощью единичных функций, используя в качестве аргумента управляющее воздействие $u(t)$.

Тогда

$$g(t) = \frac{c}{b-a} \{ [u(t)-a]h[u(t)-a] - [u(t)-b]h[u(t)-b] \}. \quad (2.83)$$

Если $u(t)=a$, то $g(t)=0$; при $u(t)=b$ имеем $g(t)=c$. В случае подачи $u(t)=t$ получим описание выходного сигнала в форме (2.80). Как следует из выражения (2.83), выходной сигнал нелинейного элемента $g(t)$ зависит от характера входного $u(t)$, причем эта зависимость отражает характерные особенности нелинейного элемента как объекта диагностирования. Итак, использование единичных функций позволяет получить более общее описание свойств нелинейных элементов для построения диагностических моделей системы при "больших" отказах.

При построении диагностических моделей для "малых" отказов можно воспользоваться таким приемом: представить нелинейную функцию $H[\cdot]$ в виде произведения определенной характеристики этой функции и признака отказа $\Delta \lambda_i$. Функция $H[\cdot]$ является в общем случае кусочно-гладкой аналитической функцией на любом конечном интервале и имеет разрывы первого рода на концах интервалов. Функция, обладающая такими свойствами, есть обобщенная функция [114]. Приращение обобщенной функции $H[\cdot]$ для "малых" отказов можно представить произведением обобщенной производной функции $H[\cdot]$ по параметру и признаком отказа $\Delta \lambda_i$ в виде

$$\Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)] = \left. \frac{\partial H[\lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda = \lambda_H} \Delta \lambda_i, \quad (2.84)$$

где $\frac{D}{\partial \lambda_i}$ — символ операции обобщенного дифференцирования по параметру λ_i . Обобщенная производная вычисляется при описании нелинейного элемента во временной области [105] по такому правилу:

$$\frac{\partial H[\lambda_i, \tilde{y}(t), t]}{\partial \lambda_i} = \frac{\partial H[\lambda_i, \tilde{y}(t), t]}{\partial \lambda_i} + \sum_j \Delta H_j \delta[t - t_j(\lambda_i)], \quad (2.85)$$

где $\frac{\partial H[\cdot]}{\partial \lambda_i}$ — обыкновенная частная производная по параметру во всех точках дифференцируемости; ΔH_j — значение скачка функции, $\Delta H_j = H[\dots, t_j(\lambda_i) + 0] - H[\dots, t_j(\lambda_i) - 0]$ при $t = t_j(\lambda_i)$; $\delta[t - t_j(\lambda_i)]$ — дельта-функция, или функция Дирака.

Если свойства существенных нелинейностей описаны с помощью селектирующих функций, то приращение $H[\cdot]$ можно выразить таким способом:

$$\Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{y}(t), t] = \left\{ \frac{\partial H[\lambda_i, \tilde{y}(t), t]}{\partial \lambda_i} + \sum_j \Delta H_j \chi[t, t_j(\lambda_i)] \right\} \Delta \lambda_i, \quad (2.86)$$

где $\chi[t, t_j(\lambda_i)]$ — селектор точки [90], т.е. функция, обладающая следующим свойством:

$$\chi(x, x_i) = \begin{cases} 1, & x = x_i; \\ 0, & x \neq x_i. \end{cases} \quad (2.87)$$

При описании нелинейных свойств элементов при рабочих управляющих воздействиях обобщенное дифференцирование необходимо проводить по такому правилу:

$$\frac{\partial H[\lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]}{\partial \lambda_i} = \frac{\partial H[\lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]}{\partial \lambda_i} + \sum_j \Delta H_j \delta[u(t) - \lambda_i]. \quad (2.88)$$

Здесь $\frac{\partial H[\cdot]}{\partial \lambda_i}$ – обыкновенная частная производная от разрывной функции, равная производной в классическом смысле во всех точках дифференцирования $H[\cdot]$ и не определенная в точках разрыва, когда $u(t) = \lambda_i'$, где λ_i' – значение параметров отказов, в которых происходит излом статических характеристик; ΔH_j – скачок функции, вычисляемый так: $\Delta H_j = H[\dots, \lambda_i' + 0] - H[\dots, \lambda_i' - 0]$ при $u(t) = \lambda_i'$.

Используя соотношение (2.84), представим структуры различных типов диагностических моделей для "малых" отказов. Динамическая диагностическая модель описывается уравнением

$$\Delta \dot{y}(t) = A \Delta y(t) - \frac{DH[\lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.89)$$

Модели такого типа будем называть MDC-моделью.

Из диагностической BLC-модели для малых $\Delta \lambda_i$ получается модель вида

$$\Delta \dot{y}(t) = G \Delta y(t) + \frac{DH[\lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0, \quad (2.90)$$

которую будем называть в дальнейшем MLC-моделью.

Статическая диагностическая модель (2.73) преобразуется для "малых" отказов в уравнение структуры

$$\Delta \dot{y}(t) = \frac{DH[\lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i; \Delta y(t_0) = 0, \quad (2.91)$$

описывающей модель типа MSC.

Более подробное описание диагностических моделей можно получить, воспользовавшись соответствующими выражениями обобщенных производных.

Пример 2.3. Построим диагностические модели BLC и MLC типов для релейной системы стабилизации угловой скорости космического корабля по каналу крена [104] для тестового режима функционирования одного

реактивного сопла (рис. 2.10). Множество возможных физических отказов состоит из отказов датчиков угла и угловой скорости, электромагнитного клапана и реактивного сопла. Для задачи установления класса отказы датчиков однозначно описываются соответствующими коэффициентами преобразования k_ϕ и $k_{\dot{\phi}}$. Отказы релейного преобразователя состоят из отказов электромагнитного клапана и описываются параметрами: а – отпускания, б – срабатывания. Отказы реактивного сопла приводят к изменению тяги и описываются параметром P_1 . В общем виде уравнение возмущенного движения разомкнутой системы стабилизации будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} \ddot{u}_\phi(t) \\ \dot{\ddot{u}}_\phi(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_\phi \\ 0 & k_{\dot{\phi}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_\phi(t) \\ \dot{\ddot{u}}_\phi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_{\dot{\phi}} \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} F[P_1, a, b, u(t)]; \quad (2.92)$$

$$\ddot{u}_\phi(t_0) = \ddot{u}_{\phi 0}; \dot{\ddot{u}}_\phi(t_0) = \dot{\ddot{u}}_{\phi 0},$$

где $\ddot{u}_\phi(t)$ и $\dot{\ddot{u}}_\phi(t)$ – напряжения с выходов датчиков угла и угловой скорости; l – плечо тяги сопла; I_x – момент инерции объекта относительно продольной оси.

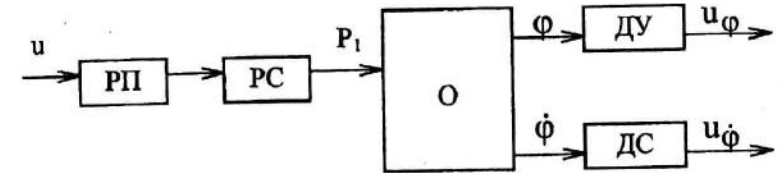


Рис.2.10. Функциональная схема разомкнутой расчетной системы стабилизации угловой скорости космического корабля по каналу крена: О – объект; ДУ – датчик угла; ДС – датчик скорости; РС – реактивное сопло; РП – релейный преобразователь

При использовании тестового сигнала управления треугольной формы на выходе релейного исполнительного элемента получается сигнал прямоугольной формы (рис. 2.11), который описывается с помощью единичных функций уравнением:

$$F[\cdot] = P_1 [h(t-b) - h(t-2u_{\max}+a)]. \quad (2.93)$$

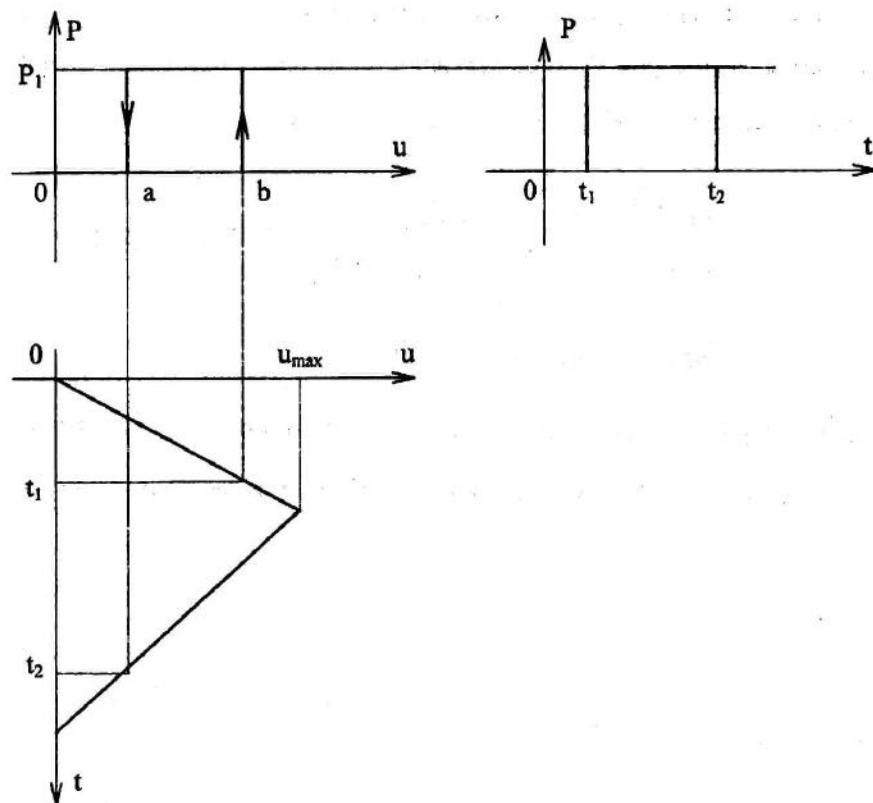


Рис.2.11. Схема прохождения тестового сигнала через РП системы

Диагностические модели типа ВЛС для рассматриваемых отказов будут иметь следующую структуру при $G = -\sigma I$:

$$\begin{aligned} k_{\phi}: \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}_{\phi}(t) \\ \Delta \dot{u}_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sigma & 0 \\ 0 & -\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{\phi}(t) \\ \Delta u_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{\Delta k_{\phi}}{k_{\phi}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_{\phi}(t) \\ \tilde{u}_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix}; \\ k_{\dot{\phi}}: \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}_{\phi}(t) \\ \Delta \dot{u}_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sigma & 0 \\ 0 & -\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{\phi}(t) \\ \Delta u_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_{\phi} \Delta k_{\dot{\phi}}}{k_{\dot{\phi}}(k_{\phi} + \Delta k_{\dot{\phi}})} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_{\phi}(t) \\ \tilde{u}_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta k_{\dot{\phi}} \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} P_1 [h(t-b) - h(t-2u_{\max}+a)]; \\ a: \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}_{\phi}(t) \\ \Delta \dot{u}_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sigma & 0 \\ 0 & -\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{\phi}(t) \\ \Delta u_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_{\dot{\phi}} \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} P_1 [h(t-2u_{\max}+a) - h(t-2u_{\max}+a-\Delta a)]; \\ b: \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}_{\phi}(t) \\ \Delta \dot{u}_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sigma & 0 \\ 0 & -\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{\phi}(t) \\ \Delta u_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_{\dot{\phi}} \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} P_1 [h(t-b-\Delta b) - h(t-b)]; \\ P_1: \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}_{\phi}(t) \\ \Delta \dot{u}_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sigma & 0 \\ 0 & -\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{\phi}(t) \\ \Delta u_{\dot{\phi}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_{\dot{\phi}} \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} \Delta P_1 [h(t-b) - h(t-2u_{\max}+a)]. \end{aligned} \quad (2.94)$$

Начальные условия для всех моделей одинаковы и равны

$$\Delta u_{\phi}(t_0) = \tilde{u}_{\phi 0}; \Delta u_{\dot{\phi}}(t_0) = \tilde{u}_{\dot{\phi} 0}.$$

При "малых" отказах модели типа МЛС совпадают с ВЛС-моделями для параметров отказов k_{ϕ} и P_1 . На основании уравнения (2.90) получим модели для параметров отказов $k_{\dot{\phi}}$, a и b :

$$k_{\dot{\varphi}} : \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}_{\varphi}(t) \\ \Delta \dot{\varphi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma & 0 \\ 0 & -\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{\varphi}(t) \\ \Delta \varphi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_{\varphi}}{k_{\dot{\varphi}}^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\varphi}(t) \\ \varphi(t) \end{bmatrix} \Delta k_{\dot{\varphi}} + \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ I_x \end{bmatrix} P_1 [h(t-b) - h(t-2u_{\max} + a)] \Delta k_{\dot{\varphi}}; \quad (2.95)$$

$$a : \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}_{\varphi}(t) \\ \Delta \dot{\varphi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma & 0 \\ 0 & -\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{\varphi}(t) \\ \Delta \varphi(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ k_{\dot{\varphi}} \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} P_1 \delta(t-2u_{\max} + a) \Delta a;$$

$$b : \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}_{\varphi}(t) \\ \Delta \dot{\varphi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma & 0 \\ 0 & -\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{\varphi}(t) \\ \Delta \varphi(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ k_{\dot{\varphi}} \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} P_1 \delta(t-b) \Delta b.$$

При линеаризации приращения функции $\Delta H[\cdot]$ отбрасываются члены более высокого порядка малости, чем $\Delta \lambda_i$, поэтому в модели для $k_{\dot{\varphi}}$ вместо вектора измерений возмущенного движения используется вектор измерений, соответствующий номинальному движению.

2.4.2. Операторные диагностические модели

Применение интегрального преобразования Лапласа позволяет построить диагностические модели в операторной форме. При разработке операторных диагностических моделей можно использовать ранее рассмотренные методы получения моделей в применении их к операторной форме, а также прямое преобразование Лапласа к полученным во временной области моделям. Рассмотрим особенности первого подхода к построению операторных диагностических моделей. Применяя прямое преобразование Лапласа к уравнению возмущенного движения (2.63), получим

$$s\tilde{Y}(s) - \tilde{y}_0 = A(\lambda)\tilde{Y}(s) + B(\lambda)F[\lambda, U(s), s], \quad (2.96)$$

где $\tilde{Y}(s)$ – изображение измеряемых переменных возмущенного движения; $\tilde{y}_0$ – вектор начальных условий; $F[\lambda, U(s), s]$ – изображение векторной нелинейной функции.

Для получения изображения выходного сигнала системы $\tilde{Y}(s)$ преобразуем уравнение (2.96), в результате чего получим

$$\tilde{Y}(s) = [Is + A(\lambda)]^{-1} B(\lambda) F[\lambda, U(s), s] + [Is - A(s)]^{-1} \tilde{y}_0, \quad (2.97)$$

где I – $(n \times n)$ -мерная единичная матрица.

Для конкретного тестового сигнала с изображением $U(s)$ и при нулевых начальных условиях системы $\tilde{y}_0 = 0$ уравнение (2.97) можно представить в такой форме:

$$\tilde{Y}(s) = W_{\text{ЛЧ}}(s) W_{\text{НЧ}}(s) U(s), \quad (2.98)$$

где $W_{\text{ЛЧ}}(s)$ – матричная передаточная функция линейной части системы; $W_{\text{НЧ}}(s)$ – матричная эквивалентная передаточная функция нелинейной части системы. Тогда передаточная функция разомкнутой системы

$$W(s) = \frac{\tilde{Y}(s)}{U(s)} = W_{\text{ЛЧ}}(s) W_{\text{НЧ}}(s). \quad (2.99)$$

С использованием принципа относительности и на основании $W(s)$, а также передаточных функций соответствующих эталонных моделей можно получить различные типы операторных диагностических моделей таким же образом, как это было сделано в подразделе 2.4.1.

Применение второго подхода позволяет получить операторные диагностические модели, используя прямое преобразование Лапласа к моделям во временной области. Рассмотрим подробно суть этого подхода.

В результате преобразования по Лапласу BDC-модели (2.67) получено уравнение

$$s\Delta Y(s) - \tilde{y}_0 = A\Delta Y(s) + \Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}(s), U(s), s], \quad (2.100)$$

которое представим в следующем виде:

$$\Delta Y(s) = [Is - A]^{-1} \Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}(s), U(s), s] + [Is - A]^{-1} \tilde{y}_0. \quad (2.101)$$

Это уравнение описывает BDC-модель в операторной форме.

Аналогичным образом можно получить диагностические модели других типов. Так, BLC-модель в операторной форме будет описываться уравнением

$$\Delta Y(s) = [Is - G]^{-1} \Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}(s), U(s), s] + [Is - G]^{-1} \tilde{y}_0. \quad (2.102)$$

Для BSC-модели операторная форма выглядит так:

$$\Delta Y(s) = Is^{-1} \Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}(s), U(s), s]. \quad (2.103)$$

Диагностические модели для "малых" отказов могут быть получены из моделей (2.101), (2.102) и (2.103) путем представления изображения $\Delta H[\cdot]$ произведением частной производной изображения по параметру λ_i и признака отказа $\Delta \lambda_i$. Следует отметить, что взятие частной производной изображения $\Delta H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}(s), U(s), s]$ осуществляется по обычным правилам дифференцирования, а также то, что согласно теореме о дифференцировании по параметру [86] между производными во временной и комплексной областях существует взаимно однозначное соответствие.

Диагностическая MDC-модель в операторной форме описывается уравнением

$$\Delta Y(s) = [Is - A]^{-1} \frac{\partial H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}(s), U(s), s]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i + [Is - A]^{-1} \tilde{y}_0. \quad (2.104)$$

Операторная форма MLC-модели представима таким образом:

$$\Delta Y(s) = [Is - G]^{-1} \frac{\partial H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}(s), U(s), s]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i + [Is - G]^{-1} \tilde{y}_0. \quad (2.105)$$

Диагностическая для "малых" отказов модель MSC-типа в операторной форме имеет вид

$$\Delta Y(s) = Is^{-1} \frac{\partial H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}(s), U(s), s]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i. \quad (2.106)$$

Рассмотрим на примере подробную структуру описанных диагностических моделей для конкретной СУ с существенной нелинейностью.

Пример 2.4. Получим в операторной форме диагностические модели BDC и MDC типов для реальной системы стабилизации (пример 2.3) при отказах, описываемых параметрами k_ϕ и b .

Изображение выходного сигнала, представленного на рис. 2.11, описывается таким выражением:

$$P(s) = P_1 \frac{e^{-t_1 s} - e^{-t_2 s}}{s} = P_1 \frac{e^{-bs} - e^{-(2u_{\max} - a)s}}{s}.$$

Уравнение возмущенного движения в операторной форме при нулевых начальных условиях будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_\phi(s) \\ \tilde{u}_\phi(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_\phi}{s^2} \frac{1}{I_x} \\ -\frac{k_\phi}{s} \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} P_1 \frac{e^{-bs} - e^{-(2u_{\max} - a)s}}{s}.$$

При использовании первого подхода к получению диагностических моделей необходимо из уравнения возмущенного движения для конкретного параметра отказа, предположим, параметра датчика угла, вычесть уравнение при номинальных значениях параметров. Тогда

$$\begin{bmatrix} \Delta u_\phi(s) \\ \Delta u_\phi(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta k_\phi}{s^2} \frac{1}{I_x} \\ 0 \end{bmatrix} P_1 \frac{e^{-bs} - e^{-(2u_{\max} - a)s}}{s}.$$

Данное уравнение представляет собой диагностические BDC-, MDC-модели для параметра отказа k_ϕ .

При отказах релейного преобразователя, описываемых параметром b , диагностическая BDC-модель представима в форме такого уравнения:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_\phi(s) \\ \Delta u_\phi(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_\phi}{s^2} \frac{1}{I_x} \\ \frac{k_\phi}{s} \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} P_1 \frac{e^{-bs}}{s} (e^{-\Delta b s} - 1). \quad (2.107)$$

Для малых значений Δb диагностическая MDC-модель будет иметь форму

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{\varphi}(s) \\ \Delta u_{\dot{\varphi}}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{\varphi}}{s^2} & \frac{1}{I_x} \\ \frac{k_{\dot{\varphi}}}{s} & \frac{1}{I_x} \end{bmatrix} P_1(-e^{-bs}) \Delta b. \quad (2.108)$$

При необходимости учета начальных условий в диагностических моделях появятся слагаемые вида $[I_s - A]^{-1} \tilde{y}_0$.

Диагностические модели в операторной форме наиболее целесообразно использовать для объектов диагностирования, исходное описание которых представлено с помощью передаточных функций, а также в практических областях, где при разработке СУ традиционно применяются методы, основанные на передаточных функциях. Операционные диагностические модели могут использоваться для решения задач как тестового, так и рабочего технического диагностирования. Выбор диагностической модели для "малых" и "больших" отказов определяется величиной максимально возможного отклонения признака отказа $\Delta \lambda_i$. Если $|\Delta \lambda_i|_{\max} \ll \Delta \lambda_{i \max}^2$, то выбирается модель для "малых" отказов, в противном случае – для "больших". Исходя из требований заданной оперативности решения соответствующей задачи диагностирования выбираются динамические свойства моделей. Результаты разработки диагностического обеспечения СУ в значительной степени зависят от структуры применяемых диагностических моделей.

2.5. Диагностические логические модели

При решении каждой из основных задач диагностирования СУ неизбежны этап, связанный с формированием машинно реализуемой совокупности признаков, обеспечивающей различимость распознаваемых характеристик отказов, а также этап, состоящий в выборе оптимальной совокупности таких признаков с использованием соответствующих технико-

экономических критериев. Для формирования разделяющей и оптимальной совокупностей признаков отказов требуются соответствующие диагностические модели, позволяющие аналитически получать искомые результаты, приемлемые в ходе решения основных задач диагностирования. На выбор формы таких моделей влияют следующие обстоятельства. Первое. Использование в качестве средства реализации диагностического обеспечения СУ экспертных, знаниеориентированных систем накладывает ограничения на форму представления информации о текущем техническом состоянии динамического объекта диагностирования. Наиболее приемлемой для задач диагностирования СУ является предикатная форма представления знаний и, в частности, с помощью двужансных предикатных уравнений. Конструктивный и простой способ организации машины логического вывода основан на использовании дихотомических деревьев поиска. Таким образом, с точки зрения современной информационной технологии эксплуатации диагностического обеспечения в большей степени подходящей является форма моделей в терминах булевой переменной. Второе. В качестве косвенных признаков объекта используются выходные сигналы рассмотренных диагностических функциональных моделей – $\Delta y(k)$, представляющие собой дискретные функции времени, изменяющиеся определенным образом для каждого прямого признака отказа. Известные в теории исследования операций подходы и методы не позволяют в этих $\Delta y(k)$ терминах ставить и решать задачи выбора наилучшей совокупности разделяющих признаков. Представление свойств косвенных признаков с помощью булевых переменных дает возможность построить соответствующие булевы таблицы, на основе которых формируются и получают разрешение различные оптимизационные задачи.

Итак, в наибольшей степени удовлетворяющими требованиям разработки и эксплуатации диагностического обеспечения являются формы моделей, использующих булевы переменные. Рассмотрим основные методы

построения и преобразования таких моделей, представляющих собой диагностические логические модели.

Метод построения табличных логических моделей. В основе данного метода лежит использование свойств чувствительности ДФМ для "малых" отказов при формировании качественной связи косвенных и прямых признаков.

В общем случае связь между признаками $\Delta y(k)$ и $\Delta \lambda_i$ может быть представлена с помощью уравнения

$$\Delta y(k) = \varphi_i(k) \Delta \lambda_i; i = \overline{1, \mu}, \quad (2.109)$$

где $\varphi_i(k)$ – функция чувствительности, соответствующей i -му признаку ДФМ по диагностическому параметру λ_i . Дискретные значения функции чувствительности вычисляются с помощью выражения, соответствующего конкретной ДФМ. Так, для ML-модели (2.15) функция чувствительности получается в результате решения следующего рекуррентного уравнения:

$$\varphi_i(k+1) = CG\varphi_i(k) + C[A_i \hat{x}(k) + B_i u(k)]; \varphi_i(k_0) = \varphi_0. \quad (2.110)$$

Для MCN-модели (2.46) функция чувствительности описывается выражением

$$\varphi_i(k+1) = \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \bigg|_{\substack{\tilde{y}(k)=y(k) \\ \lambda=\lambda_n}}; \varphi_i(k_0) = 0. \quad (2.111)$$

При исследовании СУ с существенными нелинейностями функция чувствительности для MDC-модели (2.89) имеет вид

$$\dot{\varphi}_i(t) = A\varphi_i(t) + \frac{DH[\lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]}{\partial \lambda_i}; \varphi_i(t_0) = \varphi_0, \quad (2.112)$$

а для MDC-модели в операторной форме

$$\varphi_i(s) = [Is - A]^{-1} \frac{\partial H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}(s), U(s)]}{\partial \lambda_i} + [Is - A]^{-1} \varphi_0. \quad (2.113)$$

Функция чувствительности $\varphi_i(k)$ является изменяющейся и может иметь на интервале диагностирования $[k_0, k_1]$ колебательный характер и даже принимать в отдельные моменты времени нулевые значения. Признак отказа

$\Delta \lambda_i$ содержит область определения, задаваемую как $[\Delta \lambda_{i \min}, \Delta \lambda_{i \max}]$. Для использования машинных средств перехода от ДФМ к ДЛМ предпочтительнее использовать не функции $\Delta y_i(k)$, а соответствующие им числовые характеристики. Поэтому для численной характеристики косвенного признака используем такой функционал:

$$\eta_i = \frac{1}{k' - k_0} \sum_{k=k_0}^{k'-1} |\varphi_{ij}(k) \Delta \lambda_{i \min}|, \quad (2.114)$$

где k' – номер такта квантования, до которого производится суммирование, $k' \leq k_1$. В некоторых случаях можно применять функционал вида

$$\eta_{ji}^* = \frac{1}{k' - k_0} \sum_{k=k_0}^{k'-1} \varphi_{ij}^T(k) \varphi_{ij}(k) \Delta \lambda_{i \min}^2, \quad (2.115)$$

где $\varphi_{ij}(k)$ – j -я компонента вектора чувствительности.

Для перехода от абсолютной шкалы признаков к шкале наименований используем двузначное предикатное уравнение

$$Z_j = S_2(\eta_{ij} - \delta) = \begin{cases} 1, & \text{если } \eta_{ij} \geq \delta; \\ 0, & \text{если } \eta_{ij} < \delta, j = \overline{1, m}, \end{cases} \quad (2.116)$$

где $S_2(\cdot)$ – символ двузначного предиката; δ – пороговое значение, зависящее от точности представления и последующей обработки данных. Последовательно применяя уравнение (2.116), получим прямоугольную таблицу размером $\mu \times m$. Число строк таблицы соответствует числу прямых признаков отказа $\Delta \lambda_i$, а число столбцов – размерности вектора $\Delta y(k)$. Элемент на пересечении i -й строки и j -го столбца – S_{ij} – принимает значение "0" или "1" в соответствии со свойством двузначного предиката (2.116). Общий вид этой диагностической модели представлен с помощью табл. 2.1. Такую диагностическую табличную логическую модель будем называть TL-моделью.

В ряде случаев TL-модель может строиться с использованием только векторных функций чувствительности $\varphi_i(k)$ с помощью следующего

предиката:

$$S_{ij} = S_2(|\varphi_{ij}(k)|) = \begin{cases} 1, \text{ если } |\varphi_{ij}(k)| \geq 0; \\ 0, \text{ если } |\varphi_{ij}(k)| < 0, \forall k \in T. \end{cases} \quad (2.117)$$

Косвенные признаки TL-модели связаны с косвенными признаками ДФМ таким образом:

$$Z_j = S_2(|\Delta y_j(k)|) = \begin{cases} 1, \text{ если } |\Delta y_j(k)| \geq 0; \\ 0, \text{ если } |\Delta y_j(k)| < 0. \end{cases} \quad (2.118)$$

Таблица 2.1

$\Delta\lambda_i$	Косвенные признаки				
	Z_1	...	Z_j	...	Z_m
$\Delta\lambda_1$	S_{11}	...	S_{1j}	...	S_{1m}
.	.	...	.	...	.
$\Delta\lambda_i$	S_{i1}	...	S_{ij}	...	S_{im}
.	.	...	.	...	.
.	.	...	.	...	.
$\Delta\lambda_\mu$	$S_{\mu 1}$	...	$S_{\mu j}$	...	$S_{\mu m}$

Наиболее удобными и простыми с точки зрения объема и сложности вычислений для построения TL-моделей являются ДФМ с произвольной динамикой и статические.

Формирование различающих совокупностей признаков связано с анализом влияния возможных сочетаний признаков $\Delta\lambda_i, i = \overline{1, \mu}$ на косвенные признаки Z_j . Для формализации этого анализа и выбора оптимальных различающих совокупностей признаков целесообразно использовать соответствующие диагностические логические модели.

Метод построения булевых матричных моделей. Основным принцип этого метода известен и применяется в диагностике дискретных объектов [97]. Метод основан на использовании TL-моделей и предположении о кратности отказов и их признаков [57]. В общем случае определяется количество возможных сочетаний C_μ^v , где v – характеристика возможной кратности. Рассмотрим особенности метода применительно к наиболее типичной ситуации однократных отказов. В этом случае $v = 2$. Пусть i -я и η -я строки TL-модели описываются следующими наборами булевых переменных:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_i &= (S_{i1}, \dots, S_{ij}, \dots, S_{im}) \\ \Delta\lambda_\eta &= (S_{\eta 1}, \dots, S_{\eta j}, \dots, S_{\eta m}) \end{aligned} \quad (2.119)$$

Построим такой двоичный набор

$$l_{i\eta} = (\sigma_1^{i\eta}, \dots, \sigma_j^{i\eta}, \dots, \sigma_m^{i\eta}), \quad (2.120)$$

что для $\forall j, j = \overline{1, m}$ выполняются условия

$$\sigma_j^{i\eta} = \begin{cases} 0, \text{ если } S_{ij} = S_{\eta j}; \\ 1, \text{ если } S_{ij} \neq S_{\eta j}. \end{cases} \quad (2.121)$$

Набор $l_{i\eta}$ определяет подмножество признаков $\{Z_j\}$, по которым состояния, вызванные i -м и η -м прямыми признаками, различимы. Выполнив описанное построение для возможных сочетаний наборов $\Delta\lambda_i$ и $\Delta\lambda_\eta, i = \overline{1, \mu-1}, \eta = \overline{2, \mu}, i \neq \eta$, получим некоторое множество E_0 двоичных наборов. Далее строим булеву матрицу, в которой каждая строка представляет собой набор из E_0 , при этом число строк в матрице равно числу наборов в множестве E_0 . Число столбцов равно числу признаков Z_j в TL-модели, и номер каждого столбца совпадает с номером признака. Описанная модель графически показана в виде табл. 2.2.

Таблица 2.2

l_{in}	Косвенные признаки				
	Z_1	...	Z_j	...	Z_m
l_{12}	σ_1^{12}	...	σ_j^{12}	...	σ_m^{12}
.	.	...	.	...	.
.	.	...	.	...	.
l_{in}	σ_1^{in}	...	σ_j^{in}	...	σ_m^{in}
.	.	...	.	...	.
.	.	...	.	...	.
$l_{\mu-1,\mu}$	$\sigma_1^{\mu-1,\mu}$	...	$\sigma_j^{\mu-1,\mu}$	...	$\sigma_m^{\mu-1,\mu}$

Модели, полученные с помощью изложенного метода, будем называть ВМ-моделями.

Представленные логические модели по структуре напоминают известные таблицы функций неисправностей [97], таблицы или матрицы неисправностей [122] или таблицы состояний [16]. Для получения канонических форм ТЛ- и ВМ-моделей можно воспользоваться известными методами построения проверяющих совокупностей контрольных точек [16, 97] или минимальных проверяющих тестов [122]. Эти методы позволяют получить минимальные наборы диагностических признаков, что эквивалентно построению канонических форм ДЛМ. Возможности данных методов ограничены простыми случаями небольших размерностей моделей. Для диагностических моделей большой размерности нахождение канонических форм такими методами сопряжено с трудностями визуального анализа таблиц, невозможностью определения всего множества канонических форм, отсутствием аналитического алгоритма, что затрудняет использование ЦВМ для автоматического построения минимальных наборов.

Рассмотрим один из возможных путей формализации решения задачи построения канонических форм ДЛМ, основанный на использовании идеи работы [106].

Метод построения канонических форм ДЛМ. Наиболее простой метод получения канонических форм – метод прямого перебора [97, 121] – позволяет получить все возможные формы, что сопряжено с большой трудоемкостью их определения, обусловленной громоздкими преобразованиями конъюнктивно-дизъюнктивных функций в дизъюнктивно-конъюнктивные, а также перебором полученных булевых слагаемых в целях выявления минимальных. Рассмотренное решение задачи обладает следующими характерными особенностями: 1) процесс принятия решения – многошаговый; 2) критерий качества является аддитивной функцией; 3) процесс принятия решения можно рассматривать как процесс распределения одноименных ресурсов в целях получения наилучшего конечного результата.

Выявленные особенности служат характерными признаками задачи динамического программирования, решение которой осуществляется на основе принципа оптимальности и метода Беллмана [5]. Используем идейную сторону метода динамического программирования для построения канонических форм ДЛМ. Прежде всего необходимо связать основное функциональное уравнение Беллмана с исходной логической моделью. Функциональное уравнение позволяет построить рекуррентную процедуру, реализующую принцип оптимальности.

Описанные ДЛМ изображаются в форме таблицы. Каждая строка таблицы представляет собой двоичный код, соответствующий определенному признаку или их сочетанию. Задача состоит в нахождении минимальных совокупностей косвенных признаков Z_j , которые "доставляли" хотя бы одну "1" для каждой строки. Применительно к этой задаче функциональные уравнения можно записать в следующем виде:

$$M_1 = \{Z_{j1}\}; \quad (2.122)$$

$$M_h = \left\{ \min_{\{Z'_{jh}\}} \{Z'_{jh}\} \wedge M_{h-1} \right\}, \quad (2.123)$$

где Z'_{ji} – признаки Z_j , содержащие "1" в i -й строке таблицы; M_1 – множество косвенных признаков объекта, содержащих "1" в первой строке таблицы; $\wedge$ – символ конъюнкции; M_h – множество минимальных совокупностей косвенных признаков на последнем шаге оптимизации; h – количество строк таблицы.

Используя выражения (2.122) и (2.123), можно построить всю рекуррентную процедуру поиска канонических форм ДПМ следующим образом. На первом шаге определяется множество признаков, содержащих "1" в первой строке:

$$M_1 = \{Z'_{j1}\}, \forall Z_{j1}, j = \overline{1, m}. \quad (2.124)$$

Функциональное уравнение двухшагового процесса имеет вид

$$M_2 = \left\{ \min_{\{Z'_{j2}\}} \{Z'_{j2}\} \wedge M_1 \right\}, \quad (2.125)$$

где $\{Z'_{j2}\}$ – множество косвенных признаков, содержащих "1" во второй строке. Множество M_2 определяется в результате минимизации множества конъюнктивных форм, полученных при логическом перемножении элементов множеств $\{Z'_{j2}\}$ и M_1 , причем минимизация производится по каждому элементу множества $\{Z'_{j2}\}$.

Подобная операция осуществляется на каждом последующем шаге, поэтому можно в общем виде записать функциональное уравнение для i -го шага:

$$M_i = \left\{ \min_{\{Z'_{ji}\}} \{Z'_{ji}\} \wedge M_{i-1} \right\}. \quad (2.126)$$

На последнем h -м шаге рекуррентной процедуры получаются минимальные конъюнктивные формы с помощью уравнения

$$M_h = \left\{ \min_{\{Z'_{ih}\}} \{Z'_{ih}\} \wedge M_{h-1} \right\}. \quad (2.127)$$

Каждая минимальная совокупность признаков Z_j из множества M_h порождает соответствующую каноническую форму исходной логической модели. Выбор канонической формы для решения определенной задачи производится исходя из ее условий.

Пример 2.5. Построим TL-модель и найдем ее канонические формы для трехбакового объекта (пример 2.2) при отказах, описываемых параметрами q_1 , q_2 и q_3 . При этом используем диагностические MSN-модели, имеющие вид:

$$\begin{aligned} q_1: \begin{bmatrix} \Delta h_1(k+1) \\ \Delta h_2(k+1) \\ \Delta h_3(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{T_0}{Q_1} \sqrt{2g[\tilde{h}_1(k) - \tilde{h}_2(k)]} \\ \frac{T_0}{Q_2} \sqrt{2g[\tilde{h}_1(k) - \tilde{h}_2(k)]} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta q_1; \\ q_2: \begin{bmatrix} \Delta h_1(k+1) \\ \Delta h_2(k+1) \\ \Delta h_3(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_0}{Q_2} \sqrt{2g[\tilde{h}_2(k) - \tilde{h}_3(k)]} \\ \frac{T_0}{Q_2} \sqrt{2g[\tilde{h}_2(k) - \tilde{h}_3(k)]} \end{bmatrix} \Delta q_2; \\ q_3: \begin{bmatrix} \Delta h_1(k+1) \\ \Delta h_2(k+1) \\ \Delta h_3(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{T_0}{Q_3} \sqrt{2g[\tilde{h}_3(k) - H]} \end{bmatrix} \Delta q_3. \end{aligned}$$

Для приведенных моделей TL-модель будет иметь размерность 3×3 . Исходя из структуры моделей, а также используя предикат (2.117), получаем,

что в первой строке таблицы нулевой будет третья компонента, во второй строке – первая и в третьей – первая и вторая (табл.2.3).

Таблица 2.3

Δq_i	Признаки Z_j		
	Z_1	Z_2	Z_3
Δq_1	1	1	0
Δq_2	0	1	1
Δq_3	0	0	1

Определим на основании полученной TL-модели все канонические формы. Множество признаков на первом шаге в соответствии с выражением (2.124) равно $M_1 = \{Z_1, Z_2\}$.

Для реализации второго шага необходимо предварительно найти множество $\{Z'_{j2}\}$, входящее в уравнение (2.125). Это множество состоит из признаков $\{Z_2, Z_3\}$. Теперь, согласно (2.125), требуется определить конъюнкцию первого элемента множества $\{Z_2, Z_3\}$ с элементами множества M_1 , а затем произвести минимизацию конъюнктивных форм по числу признаков, т.е. осуществить выбор минимальной среди полученных форм. Такие же действия нужно выполнить для второго элемента множества $\{Z_2, Z_3\}$, тогда совокупность всех минимальных форм и составит множество M_2 . Произведем все необходимые операции для второго шага:

$$M_2 = \left\{ \min_{\{Z_2, Z_3\}} [\{Z_2, Z_3\} \wedge \{Z_1, Z_2\}] \right\} = \left\{ \begin{aligned} &\left\{ \min_{Z_2} [Z_2 \wedge Z_1, Z_2 \wedge Z_2] \right\} = \{Z_2\}, \\ &\left\{ \min_{Z_3} [Z_3 \wedge Z_1, Z_3 \wedge Z_2] \right\} = \{Z_3 \wedge Z_1, Z_3 \wedge Z_2\} \end{aligned} \right\} = \\ = \{Z_2, Z_3 \wedge Z_1, Z_3 \wedge Z_2\}.$$

Для третьего шага множество $\{Z'_{j3}\}$ состоит только из одного элемента Z_3 . Тогда

$$M_3 = \left\{ \min_{\{Z_3\}} [Z_3 \wedge \{Z_2, Z_3 \wedge Z_1, Z_3 \wedge Z_2\}] \right\} = \\ = \left\{ \min_{Z_3} [Z_3 \wedge Z_2, Z_3 \wedge Z_3 \wedge Z_1, Z_3 \wedge Z_3 \wedge Z_2] \right\} = \\ = \{Z_3 \wedge Z_2, Z_3 \wedge Z_1\}.$$

Итак, в результате преобразований получили две канонические формы, представленные в табл. 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4

Δq_i	Признаки Z_j	
	Z_2	Z_3
Δq_1	1	0
Δq_2	1	1
Δq_3	0	1

Таблица 2.5

Δq_i	Признаки Z_j	
	Z_1	Z_3
Δq_1	1	0
Δq_2	0	1
Δq_3	0	1

Использование описанных методов позволяет автоматизировать как процесс построения TL- и ВМ-моделей, так и получение их канонических форм, используемых в последующем для выбора оптимальных совокупностей косвенных признаков и формирования дихотомических деревьев поиска

требуемых прямых признаков отказов в соответствующих задачах диагностирования.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования и разработка темы данной главы позволили получить ряд следующих результатов:

1. Выработана новая концепция построения диагностических моделей СУ для решения общей задачи диагностирования, включающей в себя обнаружение отказов, поиск места отказа, установление класса, определение вида отказа.

2. Предложены методы построения нового класса моделей – диагностических функциональных моделей для линейных СУ. Особенностью нового класса является использование в математических моделях косвенных признаков отказов, а также отражение специфических свойств СУ как объекта диагностирования.

3. Разработаны методы построения класса диагностических функциональных моделей для ранее не описанных СУ с гладкими нелинейностями. Предложенный класс диагностических моделей позволяет обеспечить потребности всех основных задач диагностирования.

4. Впервые созданы для СУ с существенными нелинейностями методы построения диагностических моделей как во временной области, так и в области комплексного переменного преобразования Лапласа. При этом для отражения свойств существенных нелинейностей разработаны способы описания с помощью функций Хевисайда и селектирующих функций.

5. Сформированы методы построения диагностических логических моделей и их канонических форм, качественно отражающих связь между косвенными и прямыми признаками отказов в терминах булевой переменной. Для построения канонических форм логических моделей предложен метод, использующий принципы динамического программирования.

ГЛАВА 3 ДИАГНОСТИРУЕМОСТЬ СУ

Принципиальным вопросом при разработке диагностического обеспечения является создание условий диагностируемости, заключающихся в возможности определения технического состояния объекта диагностирования с заданной точностью. В обеспечении диагностируемости СУ можно выделить два аспекта. Первый связан с анализом потенциальной возможности однозначного установления текущего технического состояния объекта с требуемой точностью, второй состоит в использовании результатов анализа для создания практически осуществимых условий диагностируемости. Свойства объекта диагностирования зависят как от его структуры, так и от состояния, обусловленного внешними управляющими и возмущающими воздействиями, поэтому целесообразно производить анализ как структурных, так и сигнальных его свойств с помощью соответствующих конструктивных критериев.

3.1. Основные определения и положения

Известно много работ, посвященных анализу диагностируемости объектов, представленных в различных классах математических моделей. Для непрерывных объектов предложен ряд критериев диагностируемости в работах R.Saeks и его учеников [148, 149, 152]. Эти критерии позволяют оценивать локальную общую диагностируемость нелинейных динамических систем типа "вход-выход". Оценка общей диагностируемости линейных систем, описываемых в пространстве состояний, предлагается в работе [79]. Критерии структурной диагностируемости линейных динамических систем описаны в работах [31, 32, 49]. Известные результаты по диагностируемости, как правило, или справедливы только для одного класса динамических систем, или дают возможность оценивать общую или структурную диагностируемость, зачастую не вводя практически оправданных допущений о кратности отказов. Особенно

стью этих результатов является то, что они не позволяют комплексно оценивать свойства используемых диагностических моделей для решения основных задач диагностирования СУ.

В рамках решения первой комплексной задачи исследования требуется формирование таких диагностических моделей, которые бы обеспечили успешное определение всех характеристик отказа в целях установления истинной причины аварийного состояния СУ. Выявление таких свойств диагностических моделей представляет собой анализ диагностируемости СУ. В этой главе описываются результаты исследований по созданию теоретических основ диагностируемости СУ различных классов и практического их использования для успешного решения основных задач диагностирования.

Введем ряд определений диагностируемости.

Определение 3.1. Диагностируемость — это свойство СУ, характеризующее возможность однозначного установления в ней факта наличия соответствующего прямого признака любого отказа из заданного множества по доступным наблюдениям косвенным признакам в течение конечного интервала времени.

Определение 3.2. Диагностируемость как свойство СУ отражается в математической модели возмущенного движения, представляющей собой динамическую систему, а также в диагностических функциональных моделях.

Определение 3.3. Динамическая система называется диагностируемой относительно заданного множества прямых признаков отказов $\Lambda = \{\Delta\lambda_1, \dots, \Delta\lambda_i, \dots, \Delta\lambda_\mu\}$, если факт наличия каждого из них может быть однозначно установлен по доступным измерению косвенным признакам $\Delta y^T(k) = [\Delta y_1(k), \dots, \Delta y_i(k), \dots, \Delta y_m(k)]$ на конечном интервале времени $[k_0, k_1]$.

Введенные определения позволяют подойти к формулировке ключевого положения диагностируемости динамических систем, приняв во внимание сле-

дующее очевидное обстоятельство. Для дальнейшего конструктивного изложения диагностируемости систем требуется принять конкретное допущение о кратности прямых признаков отказов. В данном исследовании, что было отражено в основных положениях концепции диагностических моделей, при формировании множества D учитываются наиболее вероятные ситуации появления отказов с помощью такой характеристики, как виды отказов. Эта характеристика позволяет описывать все возможные и наиболее вероятные свойства отказов СУ в соответствии с их классификацией (см. рис. 1.5). Например, одним видом отказа двухтактного потенциометрического датчика является смещение нуля и уменьшение коэффициента передачи, т.е. в этом виде отказа объединены такие характеристики двух отказов, как совместность их появления — двухкратность, независимость, окончательность, частичность, виды проявления и др. Иными словами, при формировании множества D учитываются все известные характеристики отказов и их потока. Это обстоятельство дает возможность для таких основных задач диагностирования, как определение вида отказа и установление класса, принять допущение об однократности появления соответствующих прямых признаков отказов. Это же допущение в первом приближении справедливо и для задачи поиска места. В тех случаях, когда признаки места отказа появляются одновременно, например, одновременные отказы датчика угла и сервопривода в системе стабилизации углового положения летательного аппарата, можно организовать использование программного модуля поиска места одного отказа так, что будут найдены и другие отказавшие функциональные элементы. Итак, допущение об однократности признаков отказа означает, что на интервале времени $[k_0, k_1]$ только один параметр отказа λ_i получает приращение $\Delta\lambda_i$ относительно своего номинального значения. Если среди вероятных величин признаков отказов $\Delta\lambda_i$ и $\Delta\lambda_j$ есть такие, что $\Delta y_i(k) = \Delta y_j(k) \quad \forall k \in [k_0, k_1]$, то это означает невозможность однозначного определения факта наличия конкретного признака по результатам измерения косвенного признака $\Delta y(k)$. Сле-

довательно, для оценки диагностируемости системы требуется сформировать все попарные сочетания косвенных признаков системы $\Delta y_i(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ и далее в каждом попарном сочетании выявлять эквивалентные признаки.

Лемма 3.1. Динамическая система полностью диагностируема на интервале $[k_0, k_1]$ в отношении однократных прямых признаков отказов, если $\exists k \in [k_0, k_1]$, что во всех попарных сочетаниях косвенных признаков отказов выполняется условие $\Delta y_i(k) \neq \Delta y_j(k)$.

Лемма 3.2. Динамическая система частично диагностируема на интервале $[k_0, k_1]$ в отношении однократных прямых признаков отказов, если среди всех попарных сочетаний косвенных признаков отказов найдется одно или несколько таких сочетаний, что $\Delta y_i(k) = \Delta y_j(k) \quad \forall k \in [k_0, k_1]$, а для всех остальных сочетаний $\exists k \in [k_0, k_1]$, что выполняется условие $\Delta y_i(k) \neq \Delta y_j(k)$.

Лемма 3.3. Динамическая система полностью недиагностируема на интервале $[k_0, k_1]$ в отношении однократных прямых признаков отказов, если во всех попарных сочетаниях косвенных признаков отказов выполняется условие $\Delta y_i(k) = \Delta y_j(k) \quad \forall k \in [k_0, k_1]$.

Приведенные леммы представляют собой в самой общей форме критерии, позволяющие оценивать степень диагностируемости динамических систем по признакам $\Delta y_i(k)$, $i = \overline{1, \mu}$. Критерии в такой форме являются достаточно общими, не обладающими инженерной конструктивностью, а также трудоемкими при практическом применении, особенно при компьютерной автоматизации процесса анализа свойств объектов диагностирования.

В сформулированных определениях и леммах для оценки степени диагностируемости динамических систем используется вектор косвенных признаков $\Delta y(k)$. В классах линейных и нелинейных динамических систем признак $\Delta y(k)$ связан с прямыми признаками отказов с помощью соответствующих диагностических моделей как для "малых", так и для "больших" отказов. В даль-

нейшем при изложении диагностируемости будем предполагать, что измерения входа $u(k)$ и выхода $\tilde{y}(k)$ системы осуществляется точно, так как наличие ошибок, помех измерения лишь снижает информативность измерений и усложняет решение задачи диагностируемости. Очевидно, что условия диагностируемости объекта исследования по точным измерениям являются необходимыми условиями асимптотической сходимости вероятностных оценок результатов к истинным значениям при наличии случайных ошибок и помех. Более общая диагностическая функциональная модель для "малых" отказов описывается уравнением

$$\Delta y_i(k) = \varphi_i(k) \Delta \lambda_i; \quad i = \overline{1, \mu}, \quad (3.1)$$

где $\varphi_i(k)$ – векторная функция чувствительности соответствующей диагностической функциональной модели. Использование такой диагностической модели позволяет сформулировать следующую теорему о диагностировании динамических систем относительно "малых" отказов, или, точнее, в малом.

Теорема 3.1. Динамическая система полностью диагностируема в малом тогда и только тогда, когда векторы $\varphi_i(k)$ и $\varphi_j(k)$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Доказательство. Необходимость. Из допущения об однократности появления прямых признаков отказов следует принцип независимости действия признаков отказов, позволяющий рассматривать последствия появления каждого прямого признака отдельно. На основании этого диагностическая модель для i -го признака отказа будет описываться уравнением (3.1), а для j -го – $\Delta y_j(k) = \varphi_j(k) \Delta \lambda_j$. Согласно лемме 3.1, условием диагностируемости динамической системы в отношении двух прямых признаков отказов является $\Delta y_i(k) \neq \Delta y_j(k)$. Подставив в это неравенство выражения соответствующих диагностических признаков, получим, что $\varphi_i(k) \Delta \lambda_i \neq \varphi_j(k) \Delta \lambda_j$. В этом неравенстве $\varphi_i(k)$ и $\varphi_j(k)$ – векторные функции одинаковой размерности, $\Delta \lambda_i$ и

$\Delta\lambda_j$ - скалярные величины. Два вектора $\varphi_i(k)$ и $\varphi_j(k)$ будут линейно независимы, если равенство $\varphi_i(k)\Delta\lambda_i - \varphi_j(k)\Delta\lambda_j = 0$ возможно только при $\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_j = 0$. Равенство прямых признаков отказа нулю означает отсутствие отказов в системе, а это противоречит исходным положениям диагностируемости. Следовательно, необходимым условием диагностируемости динамической системы в малом в отношении двух прямых признаков отказов является линейная независимость соответствующих векторов чувствительности $\varphi_i(k)$ и $\varphi_j(k)$. Так как техническое состояние системы характеризует μ прямых признаков, то для оценки диагностируемости в отношении всего множества этих признаков требуется проанализировать для векторов чувствительности все попарные сочетания, число которых определяется по формуле $C_{\mu}^2 = \frac{\mu!}{2!(2-\mu)!}$. Очевидно, что необходимым условием диагностируемости будет линейная независимость векторов чувствительности во всех попарных сочетаниях.

Достаточность. Линейная независимость двух векторных функций чувствительности $\varphi_i(k)$ и $\varphi_j(k)$ означает, что не существуют такие величины признаков отказов $\Delta\lambda_i$ и $\Delta\lambda_j$, что один вектор можно выразить через другой, т.е. справедливо такое неравенство: $\varphi_i(k)\Delta\lambda_i \neq \varphi_j(k)\Delta\lambda_j$. В соответствии с уравнением диагностической модели (3.1) произведение определенных функций чувствительности и прямого признака отказа представляет собой соответствующий косвенный признак системы. Тогда из неравенства следует $\Delta y_i(k) \neq \Delta y_j(k)$, что, согласно лемме 3.1, означает диагностируемость системы в отношении i -го и j -го прямых признаков отказов. Поскольку для системы существует C_{μ}^2 попарных сочетаний косвенных признаков, то неравенство их во всех попарных сочетаниях обеспечивает достаточные условия полной диагностируемости динамической системы в малом.

Теорема доказана.

Таким образом, для оценки диагностируемости динамической системы, как линейной, так и нелинейной, требуется сформировать функции чувствительности и проанализировать характер их совместного поведения во всех попарных сочетаниях.

Теорема 3.2. Динамическая система частично диагностируема в малом тогда и только тогда, когда среди векторов $\varphi_i(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ найдется одно или несколько попарных сочетаний с линейно зависимыми векторами, а все остальные векторы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Доказательство этой теоремы производится таким же способом, как и теоремы 3.1.

Теорема 3.3. Динамическая система полностью недиагностируема в малом тогда и только тогда, когда векторы чувствительности $\varphi_i(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях.

Использование положения леммы 3.3 делает доказательство теоремы очевидным.

Рассмотренные теоремы показывают, что анализ диагностируемости в малом динамических систем можно производить с помощью функций чувствительности. Каким же образом анализировать объекты диагностирования при "больших" отказах? Оказывается (об этом свидетельствует опыт практической работы), что в ряде случаев выводы по диагностируемости в малом можно распространить и на "большие" отказы, т.е. на диагностируемость системы в большом. Эти случаи отражены в следующем утверждении.

Утверждение 3.1. Динамическая система, обладающая каким-то определенным свойством диагностируемости (полностью, частично диагностируема или полностью недиагностируема) в малом, сохраняет это свойство и в большом, если диагностические параметры отказов λ_i , $i = \overline{1, \mu}$ входят линейно в

ее коэффициенты, а также сохраняет свойство полной диагностируемости в большом, если векторы $\varphi_i(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ имеют различную структуру.

Во всех остальных случаях требуется производить дополнительный анализ функций чувствительности второго, третьего и других порядков. Итак, сформулированное утверждение позволяет производить анализ диагностируемости некоторых динамических систем в большом, используя только диагностические модели первого приближения, т.е. при малых величинах прямых признаков.

Из рассмотренных основных положений следует, что анализ диагностируемости динамических систем сводится к исследованию свойства диагностических функциональных моделей, характеризуемых функцией чувствительности. По сути своей это исследование представляет оценку качества или пригодности сформулированных диагностических моделей для решения соответствующей задачи диагностирования.

3.2. Диагностируемость линейных динамических систем

Учет особенностей класса линейных моделей СУ позволяет получить более конструктивные результаты по оценке диагностируемости линейных динамических систем [42, 51, 52, 65]. Рассмотрим линейную динамическую систему, описываемую в таком виде:

$$\begin{aligned}\tilde{x}(k+1) &= A(\lambda)\tilde{x}(k) + B(\lambda)u(k); & \tilde{x}(k_0) &= \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= C(\lambda)\tilde{x}(k) + D(\lambda)u(k) + F(\lambda).\end{aligned}\quad (3.2)$$

Следует отметить, что приведенная система представляет собой неявную диагностическую модель СУ, в которой применяются только диагностические параметры: прямые $\lambda^T = [\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_\mu]$ и косвенные $\tilde{y}(k)$, $\dim \tilde{y}(k) = m$. Используем более общую диагностическую функциональную модель для "малого" i -го отказа – MD-модель:

$$\begin{aligned}\Delta x_i(k+1) &= A\Delta x_i(k) + A_i x(k)\Delta\lambda_i + B_i u(k)\Delta\lambda_i; & \Delta x_i(k_0) &= \tilde{x}_0; \\ \Delta y_i(k) &= C\Delta x_i(k) + C_i x(k)\Delta\lambda_i + D_i u(k)\Delta\lambda_i + F_i \Delta\lambda_i.\end{aligned}\quad (3.3)$$

Из этой модели можно получить другие типы ДФМ. Так, при $A=0, C_i=D_i=0$ и $F_i=0$ получается MS-модель, а при $A=G, C_i=D_i=0$ и $F_i=0$ имеет место ML-модель. В результате проведенных исследований выявлено следующее условие диагностируемости в терминах MD-модели.

Теорема 3.4. Линейная динамическая система полностью диагностируема в малом тогда и только тогда, когда характеристические векторы $\psi_i(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях. Характеристический вектор описывается выражением

$$\psi_i(k) = \begin{bmatrix} A_i & B_i & 0 \\ C_i & D_i & F_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Доказательство. Необходимость. Воспользуемся доказательством от противного. При этом будем рассматривать влияние каждого прямого признака в отдельности, что следует из принципа независимости влияния признаков, и проведем доказательство для двух любых i -го и j -го прямых признаков отказов. Допустим, что характеристические векторы $\psi_i(k)$ и $\psi_j(k)$ линейно зависимы. Тогда существуют такие числа $\Delta\lambda_i$ и $\Delta\lambda_j$, что $\varphi_i(k)\Delta\lambda_i - \varphi_j(k)\Delta\lambda_j = 0$. Выразим характеристические векторы исходя из структуры уравнений (3.3), и на основании исходного равенства получим первое равенство

$$\Delta x_i(k+1) - A\Delta x_i(k) = \Delta x_j(k+1) - A\Delta x_j(k),$$

из анализа которого вытекает, что $\Delta x_i(k) \equiv \Delta x_j(k)$. Второе равенство имеет вид

$$\Delta y_i(k) - C\Delta x_i(k) = \Delta y_j(k) - C\Delta x_j(k).$$

Если воспользоваться результатом анализа первого равенства, то из второго равенства следует, что $\Delta y_i(k) \equiv \Delta y_j(k)$. А это означает, согласно лемме 3.3, что

динамическая система полностью недиагностируема, что, в свою очередь, противоречит условию теоремы. Полученное противоречие показывает, что допущение о линейной независимости характеристических векторов неверно, а значит, необходимость доказана.

Достаточность. Допустим, что динамическая система полностью недиагностируема, тогда для любых двух признаков, согласно лемме 3.3, можно записать, что $\Delta y_i(k) = \Delta y_j(k)$. Следовательно, существует такая невырожденная квадратная матрица T , при которой $\Delta x_j(k) = T \Delta x_i(k)$. Если воспользоваться структурой уравнений (3.3) для j -го признака, то диагностические модели для двух признаков будут эквивалентны при таком условии:

$$\begin{aligned} A &= T^{-1}AT; [A_i \Delta \lambda_i \quad B_i \Delta \lambda_i] = T^{-1}[A_j \Delta \lambda_j \quad B_j \Delta \lambda_j]; \\ C &= CT; [C_i \Delta \lambda_i \quad D_i \Delta \lambda_i] = [C_j \Delta \lambda_j \quad D_j \Delta \lambda_j]; F_i \Delta \lambda_i = F_j \Delta \lambda_j. \end{aligned}$$

Так, если диагностическая модель для i -го признака находится в канонической строчной наблюдаемой форме, получаемой с помощью инвариантов Эрмита или Кронекера, то для такой модели является характерным существование единичной матрицы преобразования $T=I$ [89]. Диагностическая модель для j -го признака также находится в канонической строчной наблюдаемой форме, и для нее характерно наличие единичной матрицы преобразования. Следовательно, для эквивалентного преобразования диагностических моделей существует матрица преобразования $T=I$. Тогда $\Delta x_j(k) = \Delta x_i(k)$. Применяя это условие и первое уравнение MD-модели (3.3) для i -го и j -го признаков, получим

$$A \Delta x_i(k) + A_i x(k) \Delta \lambda_i + B_i u(k) \Delta \lambda_i = A \Delta x_j(k) + A_j x(k) \Delta \lambda_j + B_j u(k) \Delta \lambda_j.$$

Поскольку $\Delta x_j(k) = \Delta x_i(k)$, то $A \Delta x_i(k) = A \Delta x_j(k)$ и, значит,

$$A_i x(k) \Delta \lambda_i + B_i u(k) \Delta \lambda_i = A_j x(k) \Delta \lambda_j + B_j u(k) \Delta \lambda_j.$$

Используя уравнение выхода MD-модели, имеем

$$C \Delta x_i(k) + C_i x(k) \Delta \lambda_i + D_i u(k) \Delta \lambda_i + F_i \Delta \lambda_i = C \Delta x_j(k) + C_j x(k) \Delta \lambda_j + D_j u(k) \Delta \lambda_j + F_j \Delta \lambda_j.$$

Исключив в обеих частях равенства одинаковые слагаемые, получим

$$C_i x(k) \Delta \lambda_i + D_i u(k) \Delta \lambda_i + F_i \Delta \lambda_i = C_j x(k) \Delta \lambda_j + D_j u(k) \Delta \lambda_j + F_j \Delta \lambda_j.$$

Применив векторно-матричную форму описания, полученные равенства можно представить как

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i & 0 \\ C_i & D_i & F_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \\ 1 \end{bmatrix} \Delta \lambda_i = \begin{bmatrix} A_j & B_j & 0 \\ C_j & D_j & F_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \\ 1 \end{bmatrix} \Delta \lambda_j$$

или в более компактном виде: $\psi_i(k) \Delta \lambda_i = \psi_j(k) \Delta \lambda_j$, означая, что векторы $\psi_i(k)$ и $\psi_j(k)$ линейно зависимы. Линейная зависимость векторов противоречит заключению теоремы, следовательно, предположение о недиагностируемости ложно, и достаточность доказана.

Итак, для оценки диагностируемости линейной динамической системы в малом, т.е. вблизи окрестности точки λ_{iH} , $i = \overline{1, \mu}$, требуется сформировать векторы $\psi_i(k)$ для каждого признака отказа $\Delta \lambda_i$, затем составить попарные сочетания, число которых $C_{\mu}^2 = \frac{\mu!}{2!(2-\mu)!}$, и произвести анализ их зависимости.

Характеристический вектор (3.4) отражает как структурные, так и сигнальные свойства системы при i -м признаке отказа. Для отдельного анализа этих свойств представим вектор $\psi_i(k)$ в виде произведения составной матрицы

$$L_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i & 0 \\ C_i & D_i & F_i \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

и составного вектора

$$v^T = [x(k) \quad u(k) \quad 1]. \quad (3.6)$$

Для полной диагностируемости системы требуется, чтобы характеристические векторы были линейно независимы во всех попарных сочетаниях, т.е. выполнялось неравенство $\psi_i(k) \Delta \lambda_i \neq \psi_j(k) \Delta \lambda_j$, $\forall i, j$, $i, j = \overline{1, \mu}$, $i \neq j$. Это условие с учетом новых обозначений представим в форме

$$(L_i \Delta \lambda_i - L_j \Delta \lambda_j) b(k) \neq 0. \quad (3.7)$$

Данное соотношение удовлетворяется, если: а) $(L_i \Delta \lambda_i - L_j \Delta \lambda_j) \neq 0$;

б) $u(k) \neq 0$; в) в результирующей матрице, есть хотя бы одна строка, не ортогональная вектору $u(k)$.

Анализ неравенства (3.7) соответствует исследованию определенных свойств системы, от которых зависит ее диагностируемость. Так, выполнение условия "а" связано с анализом линейной независимости составных матриц L_i , $i = \overline{1, \mu}$ во всех попарных сочетаниях. Матрицы L_i отражают структурные особенности исследуемой системы, и поэтому с их помощью можно исследовать структурную диагностируемость, т.е. свойство структуры системы, обеспечивающее возможность однозначного установления факта наличия каждого признака $\Delta \lambda_i$, $i = \overline{1, \mu}$ по доступным наблюдениям косвенным признакам в течение заданного интервала времени $[k_0, k_1]$.

Следствие 3.1 (критерий полной структурной диагностируемости). Для полной структурной диагностируемости линейной динамической системы в малом необходимо и достаточно, чтобы матрицы L_i , $i = \overline{1, \mu}$ были линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Предложенный критерий позволяет на основании анализа попарных сочетаний матриц L_i , $i = \overline{1, \mu}$ установить свойство структуры исследуемой системы, а также свойство диагностических моделей.

Условие "б" выполнения неравенства (3.7) означает, что диагностирование системы возможно только в режиме функционирования, вызванного подачей рабочих или тестовых управляющих воздействий $u(k)$, а также влиянием ненулевых начальных условий $\tilde{x}_0$. Выполнение условия "в" связано с формированием такого вектора $u(k)$ для структурно диагностируемой системы ($L_i = L_i^*$, $i = \overline{1, \mu}$), что обеспечивается выполнение неравенства (3.7). Следовательно, выбор вектора $u(k)$ связан с анализом сигнальных свойств системы в отношении ее диагностируемости.

Определение 3.4. Сигнальная диагностируемость – это свойство сигналов системы, обеспечивающее возможность однозначного установления факта наличия любого из заданных прямых признаков отказов по доступным измерениям косвенным признакам в течение конечного интервала $[k_0, k_1]$.

Раскрыв скобки в выражении (3.7) и отражая факт структурной диагностируемости системы, получим неравенство такого вида:

$$L_i^* u(k) \Delta \lambda_i - L_j^* u(k) \Delta \lambda_j \neq 0. \quad (3.8)$$

Из него вытекает, что условием его выполнения является линейная независимость векторов $L_i^* u(k)$ и $L_j^* u(k)$, и поэтому справедливо такое следствие теоремы 3.4.

Следствие 3.2 (критерий полной сигнальной диагностируемости). Линейная динамическая система, полностью структурно диагностируемая, будет полностью сигнально диагностируема в малом тогда и только тогда, когда векторы $L_i^* u(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Из приведенного критерия следует, что для оценки сигнальных свойств системы, полностью структурно диагностируемой в малом, требуется сформировать векторы $L_i^* u(k)$, $i = \overline{1, \mu}$, выбрав воздействия $u(k)$, и проанализировать все попарные сочетания в отношении линейной независимости.

Исследование других степеней диагностируемости динамических систем позволили получить следующие результаты.

Теорема 3.5. Линейная динамическая система частично диагностируема в малом тогда и только тогда, когда среди характеристических векторов ψ_i , $i = \overline{1, \mu}$ найдется хотя бы одна линейно зависимая пара, а все остальные характеристические векторы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Доказательство. Разобьем все множество косвенных признаков $\Delta y_i(k)$ на два подмножества: первое включает в себя два признака $\Delta y_v(k)$ и $\Delta y_q(k)$,

для которых выполняется условие, что $\Delta y_v(k) = \Delta y_q(k)$ на интервале диагностирования $[k_0, k_1]$. Второе подмножество состоит из оставшихся $\mu - 2$ признаков, для которых справедливо условие $\Delta y_i(k) \neq \Delta y_j(k), \forall k \in [k_0, k_1]$. Если рассматривать независимо эти два подмножества, то для второго подмножества признаков справедлива лемма 3.1, и, согласно теореме 3.4, система будет полностью диагностируема, а соответствующие признакам характеристические векторы будут линейно независимы в попарных сочетаниях. Далее рассмотрим первое подмножество признаков.

Необходимость. Согласно условию теоремы, $\Delta y_v(k) = \Delta y_q(k)$, следовательно, существует невырожденная квадратная матрица эквивалентных преобразований T , позволяющая от MD-модели (3.3) для q -го признака перейти к такой же модели для v -го признака с помощью соотношения $\Delta x_v(k) = T \Delta x_q(k)$. Для строчной наблюдаемой канонической формы MD-модели существует такая матрица наблюдаемости, что составленная из нее матрица преобразований T будет единичной [89]. Следовательно, $\Delta x_v(k) = \Delta x_q(k)$, и тогда, исходя из модели (3.3), запишем, используя первое уравнение,

$$A_v x(k) \Delta \lambda_v + B_v u(k) \Delta \lambda_v = A_q x(k) \Delta \lambda_q + B_q u(k) \Delta \lambda_q,$$

и на основании второго уравнения получим

$$C_v x(k) \Delta \lambda_v + D_v u(k) \Delta \lambda_v + F_v \Delta \lambda_v = C_q x(k) \Delta \lambda_q + D_q u(k) \Delta \lambda_q + F_q \Delta \lambda_q.$$

Скомпоновав эти два равенства вместе и применяя обозначение (3.4), представим полученный результат в следующей форме: $\psi_v(k) \Delta \lambda_v = \psi_q(k) \Delta \lambda_q$. Данное векторное равенство означает, что векторы $\psi_v(k)$ и $\psi_q(k)$ линейно независимы, что соответствует первой части утверждения теоремы.

Достаточность. Исходя из первой части утверждения, можно записать, что для v -го и q -го признаков выполняется такое условие:

$\psi_v(k) \Delta \lambda_v = \psi_q(k) \Delta \lambda_q$. Применяя структуру MD-модели для v -го и q -го признаков и на основании исходного равенства получим, что

$$\Delta x_v(k+1) - A \Delta x_v(k) = \Delta x_q(k+1) - A \Delta x_q(k)$$

и, следовательно, $\Delta x_v(k) = \Delta x_q(k)$. Для уравнений выходов MD-моделей типа (3.3), используя исходное условие, имеем

$$\Delta y_v(k) - C \Delta y_v(k) = \Delta y_q(k) - C \Delta y_q(k).$$

Из полученного равенства следует, что $\Delta y_v(k) = \Delta y_q(k)$. А это означает, согласно лемме 3.3, недиагностируемость системы относительно v -го и q -го признаков, что соответствует условию теоремы. Теорема доказана.

Использование утверждения теоремы 3.5 позволяет сформулировать конструктивные следствия для оценки отдельных свойств системы.

Следствие 3.3 (критерий частичной структурной диагностируемости). Линейная динамическая система частично структурно диагностируема в малом, если и только если среди всех попарных сочетаний матриц $L_i, i = \overline{1, \mu}$ найдется хотя бы одна линейно зависимая пара, а все остальные матрицы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Следствие 3.4 (критерий частичной сигнальной диагностируемости). Линейная динамическая система, полностью структурно диагностируемая, будет частично сигнально диагностируема в малом, если и только если среди попарных сочетаний векторов $L_i^* v(k), i = \overline{1, \mu}$ найдется хотя бы одна пара линейно зависимых векторов, а все остальные векторы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Для линейной системы, которая не может быть диагностируема, получен такой результат.

Теорема 3.6. Линейная динамическая система полностью недиагностируема в малом тогда и только тогда, когда во всех попарных сочетаниях характеристические векторы $\psi_i(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы.

Доказательство этой теоремы становится очевидным, если воспользоваться способом доказательства необходимых и достаточных условий в теореме 3.5. Из теоремы 3.6 вытекает ряд следствий, позволяющих отдельно оценивать структурные и сигнальные свойства системы.

Следствие 3.5 (критерий полной структурной недиагностируемости). Линейная динамическая система полностью структурно недиагностируема в малом, если и только если матрицы L_i , $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях.

Следствие 3.6 (критерий полной сигнальной недиагностируемости). Линейная динамическая система, полностью структурно диагностируемая, будет полностью сигнально недиагностируема в малом, если и только если векторы $L_i^* \cup(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях.

Как вытекает из следствий 3.2, 3.4 и 3.6, для оценки сигнальных свойств системы требуется вначале произвести оценку ее структурных свойств, и, если система будет полностью структурно диагностируема в малом, только тогда можно приступить к выявлению возможности диагностирования системы для управляющих воздействий $u(k) \in U^n$ или начальных условий $\tilde{x}_0$. Если исследуемая система частично структурно диагностируема или полностью недиагностируема, то никаким управляющим воздействием или начальными условиями нельзя сделать ее диагностируемой, т.е. недостатки и несовершенство структуры системы не компенсируются никакими сигнальными воздействиями. Поэтому исходная для анализа сигнальных свойств система должна быть полностью структурно диагностируема.

Все приведенные критерии структурной диагностируемости позволяют оценивать степень структурной диагностируемости линейных динамических систем. Введем количественную оценку степени структурной диагностируемости — индекс структурной диагностируемости ρ' , определяемый с помощью соотношения

$$\rho' = p - q', \quad (3.9)$$

где p — количество возможных попарных сочетаний матриц коэффициентов чувствительности, вычисляемое по формуле $p = C_{\mu}^2 = \frac{\mu!}{2!(2-\mu)!}$; q' — количество попарных сочетаний с линейно зависимыми матрицами. Если индекс диагностируемости $\rho' = p$, то это означает, что все матрицы в попарных сочетаниях линейно независимы, и анализируемая система полностью структурно диагностируема. При $1 \leq q' \leq p-1$ индекс ρ' принимает значения в интервале $1 \leq \rho' \leq p-1$, что соответствует состоянию частичной структурной диагностируемости системы. Когда в результате анализа установлено, что все матрицы в попарных сочетаниях линейно независимы, индекс диагностируемости $\rho' = p$, так как $q' = 0$.

Введем аналогичную количественную характеристику степени сигнальной диагностируемости, которую назовем индексом сигнальной диагностируемости и обозначим его как ρ'' . Численное значение индекса определяется по формуле

$$\rho'' = p - q'', \quad (3.10)$$

где q'' — количество попарных сочетаний с линейно зависимыми характеристическими векторами. Для полностью сигнально диагностируемой системы характеристические векторы линейно независимы во всех попарных сочетаниях, значит, $q'' = 0$, а индекс сигнальной диагностируемости $\rho'' = p$. Если система полностью сигнально недиагностируема, то все характеристические векторы линейно зависимы в попарных сочетаниях, следовательно, $q'' = p$ и

$\rho'' = 0$. При частичной сигнальной диагностируемости системы $1 \leq q'' \leq p-1$, и величина индекса всегда удовлетворяет условию $1 \leq \rho'' \leq p-1$.

Использование индексов диагностируемости ρ' и ρ'' позволяет производить для систем количественную оценку степени диагностируемости, а также сравнение их по степени диагностируемости.

Полученные критерии диагностируемости дают возможность оценивать свойства диагностических моделей, используемых для решения задач поиска места и установления класса отказов.

Пример 3.1. Произведем анализ диагностируемости пневматического сервопривода (см. пример 2.1) относительно признаков места отказов $\Lambda = \{\Delta K_3, \Delta T_{PM}, \Delta K_{II}\}$. На основании моделей (2.37) и (2.38) сформируем матрицы L_1 :

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{T_0 k_2 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}} & 0 & 0 \\ -\frac{2T_0 k_1 k_3 k_2 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}} & 0 & K_1 \\ \frac{T_0 k_1 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}} & 0 & 0 \end{bmatrix}; L_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{T_0 k_2 k_3 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}^2} & \frac{T_0}{T_{PM}^2} & 0 \\ T_0 k_1 k_3^2 k_2 k_{II} k_{PM} & 0 & 0 \\ \frac{T_0 k_1 k_3 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}^2} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$L_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{T_0 k_2 k_3 k_{PM}}{T_{PM}} & 0 & 0 \\ -\frac{T_0 k_1 k_3^2 k_2 k_{PM}}{T_{PM}} & 0 & 0 \\ \frac{T_0 k_1 k_3 k_{PM}}{T_{PM}} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Все полученные матрицы отличаются друг от друга структурой, поэтому в попарных сочетаниях они будут линейно независимы, следовательно, $\rho' = 3$ и сервопривод полностью структурно диагностируем относительно признаков места отказов на основании используемых диагностических MD-моделей.

Характеристические векторы $\psi_i(k)$ описываются выражениями:

$$\psi_1(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_0 k_2 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}} \hat{x}_1(k) + K_1 U_3(k) \\ \frac{T_0 k_1 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}} \hat{x}_1(k) \end{bmatrix};$$

$$\psi_2(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_0 k_2 k_3 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}^2} \hat{x}_1(k) + \frac{T_0}{T_{PM}^2} \hat{x}_2(k) \\ \frac{T_0 k_1 k_3^2 k_2 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}^2} \hat{x}_1(k) \\ -\frac{T_0 k_1 k_3 k_{II} k_{PM}}{T_{PM}^2} \hat{x}_1(k) \end{bmatrix};$$

$$\psi_3(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_0 k_2 k_3 k_{PM}}{T_{PM}} \hat{x}_1(k) \\ -\frac{T_0 k_1 k_3^2 k_2 k_{PM}}{T_{PM}} \hat{x}_1(k) \\ \frac{T_0 k_1 k_3 k_{PM}}{T_{PM}} \hat{x}_1(k) \end{bmatrix}.$$

Анализ трех попарных сочетаний полученных векторов свидетельствует, что отказавшие функциональные элементы сервопривода могут быть определены в переходном режиме, когда $\hat{x}_1(k) \neq 0$ и $\hat{x}_2(k) \neq 0$ как при "малых", так и при "больших" отказах, так как $\rho'' = 3$.

Изложенные в этом параграфе результаты исследования позволяют для класса линейных динамических систем производить оценку структурных и сигнальных свойств построенных диагностических моделей, используя только их существенные особенности в форме характеристических векторов.

3.3. Диагностируемость динамических систем с гладкими нелинейностями

Условия диагностируемости динамических систем с гладкими нелинейностями рассмотрим, исходя из диагностических функциональных моделей для "малых" отказов. Запишем в общем виде базовые диагностические модели, полученные в п. 2.3 для этого класса систем:

$$\begin{aligned} \text{MDN-модель: } \Delta y_i(k+1) &= \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} \Delta y_i(k) + \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i(k); \quad \Delta y_i(k_0) = \tilde{y}_0; \\ \text{MSN-модель: } \Delta y_i(k+1) &= \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i(k); \quad \Delta y_i(k_0) = 0; \\ \text{MLN-модель: } \Delta y_i(k+1) &= \left[\frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} - K \right] \Delta y_i(k) + \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i(k); \quad \Delta y_i(k_0) = \tilde{y}_0. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Наиболее общей из приведенных моделей является MLN-модель в силу того, что другие типы моделей могут быть получены из этой соответствующим выбором матрицы K . Так, при выборе матрицы $K=0$ получается MDN-модель; если $K = \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)}$, то имеет место MSN-модель. Представим MLN-модель в таком виде:

$$\Delta y_i(k+1) = G[\cdot] \Delta y_i(k) + F_i[\cdot] \Delta \lambda_i; \quad \Delta y_i(k_0) = \tilde{y}_0, \quad (3.12)$$

где $G[\cdot] = \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \tilde{y}(k)} - K$; $F_i[\cdot] = \frac{\partial \tilde{f}[\cdot]}{\partial \lambda_i}$. Динамические свойства модели характеризуется матрица $G[\cdot]$, а влияние малого признака отказа $\Delta \lambda_i$ на выходной сигнал отражает вектор $F_i[\cdot]$, причем в этом векторе заключены характеристики как структурных, так и сигнальных свойств объекта диагностирования. Следует отметить, что $F_i[\cdot]$ является такой характеристикой объекта, которая не зависит от типа используемой диагностической функциональной модели, что становится

очевидным при анализе моделей (3.11). Вектор $F_i[\cdot]$ назовем характеристическим.

В классе динамических систем с гладкими нелинейностями в результате проведенных исследований получен ряд результатов.

Теорема 3.7. Динамическая система с гладкими нелинейностями полностью диагностируема в малом тогда и только тогда, когда характеристические векторы $F_i[\cdot]$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Доказательство. Необходимость. Используем метод доказательства от противного. Предположим, что любые два характеристических вектора $F_i[\cdot]$ и $F_j[\cdot]$ линейно зависимы. Тогда существуют такие числа $\Delta \lambda_i$ и $\Delta \lambda_j$, что справедливо равенство $F_i[\cdot] \Delta \lambda_i = F_j[\cdot] \Delta \lambda_j$. Выразим эти характеристические векторы исходя из структуры уравнения (3.12) и на основании равенства получим

$$\Delta y_i(k+1) - G[\cdot] \Delta y_i(k) = \Delta y_j(k+1) - G[\cdot] \Delta y_j(k).$$

Из анализа этого выражения следует, что $\Delta y_i(k) = \Delta y_j(k)$. Согласно лемме 3.3, полученное условие означает полную недиагностируемость системы. Такой вывод противоречит условию теоремы о полной диагностируемости системы. Полученное противоречие свидетельствует, что предположение о линейной зависимости характеристических векторов в попарных сочетаниях неверно, и, следовательно, необходимость доказана.

Достаточность. Допустим, что система полностью недиагностируема, и тогда, в соответствии с леммой 3.3, для любой пары признаков справедливо такое соотношение: $\Delta y_i(k) = \Delta y_j(k)$. Причем справедливо оно для каждого момента времени, а значит, $\Delta y_i(k+1) = \Delta y_j(k+1)$. Воспользовавшись структурой уравнения (3.12) для i -го и j -го признаков, получим на основании соотношения такое равенство:

$$G[\cdot] \Delta y_i(k) + F_i[\cdot] \Delta \lambda_i = G[\cdot] \Delta y_j(k) + F_j[\cdot] \Delta \lambda_j.$$

Из него следует

$$F_i[\cdot]\Delta\lambda_i = F_j[\cdot]\Delta\lambda_j,$$

а это означает, что характеристические векторы $F_i[\cdot]$ и $F_j[\cdot]$ линейно зависимы. Данный вывод противоречит заключению теоремы. Полученное противоречие свидетельствует о ложности допущения о полной недиагностируемости системы. Таким образом, достаточность теоремы доказана.

Итак, оценку диагностируемости динамических систем с гладкими нелинейностями, а также соответствующих диагностических моделей можно производить с использованием характеристических векторов $F_i[\cdot]$ путем анализа их зависимости во всех попарных сочетаниях. Рассмотрим другие возможные свойства систем.

Теорема 3.8. Динамическая система с гладкими нелинейностями частично диагностируема в малом тогда и только тогда, когда среди характеристических векторов $F_i[\cdot]$, $i = \overline{1, \mu}$ найдется хотя бы одна линейно зависимая пара, а все остальные характеристические векторы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Доказательство. Представим все множество косвенных признаков $\Delta y_i(k)$ с помощью двух подмножеств. Первое состоит из двух таких признаков, для которых выполняется условие $\Delta y_v(k) = \Delta y_q(k)$. Второе подмножество включает в себя оставшиеся $\mu - 2$ таких признака, что во всех попарных сочетаниях справедливо следующее неравенство: $\Delta y_i(k) \neq \Delta y_j(k)$. Для второго подмножества признаков справедлива лемма 3.1, и, согласно теореме 3.7, система будет полностью диагностируема относительно такого же подмножества прямых признаков, а соответствующие характеристические векторы – линейно независимы во всех попарных сочетаниях. Теперь перейдем к рассмотрению первого подмножества признаков.

Необходимость. Согласно условию теоремы, для признаков подмноже-

ства выполняется соотношение $\Delta y_v(k) = \Delta y_q(k)$. Естественно, что оно выполняется и для других моментов времени, в частности, для $k+1$, т.е. $\Delta y_v(k+1) = \Delta y_q(k+1)$. Используя структуру MLN-модели (3.12) для v -го и q -го признаков, а также последние соотношения, получим, что

$$G[\cdot]\Delta y_v(k) + F_v[\cdot]\Delta\lambda_v = G[\cdot]\Delta y_v(k) + F_q[\cdot]\Delta\lambda_q.$$

Сократив первые слагаемые в обеих частях равенства в силу их одинаковости, запишем выражение

$$F_v[\cdot]\Delta\lambda_v = F_q[\cdot]\Delta\lambda_q,$$

которое означает, что характеристические векторы линейно зависимы, что соответствует первой части утверждения теоремы.

Достаточность. Из первой части утверждения следует, что для v -го и q -го характеристических векторов выполняется такое соотношение: $F_v[\cdot]\Delta\lambda_v = F_q[\cdot]\Delta\lambda_q$. Представим его, используя структуру MLN-модели для v -го и q -го признаков, в результате чего получим

$$\Delta y_v(k+1) - G[\cdot]\Delta y_v(k) = \Delta y_v(k+1) - G[\cdot]\Delta y_q(k).$$

Из этого равенства вытекает, что $\Delta y_v(k) = \Delta y_q(k)$. Согласно лемме 3.3, это означает недиагностируемость системы относительно v -го и q -го прямых признаков. Такой вывод соответствует условию теоремы. Теорема доказана.

Для оценки полностью недиагностируемой системы получен следующий результат.

Теорема 3.9. Динамическая система с гладкими нелинейностями полностью недиагностируема в малом тогда и только тогда, когда во всех попарных сочетаниях характеристические векторы $F_i[\cdot]$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы.

Доказательство. Необходимость. Из условия теоремы и леммы 3.3 следует, что во всех попарных сочетаниях косвенных признаков справедливо соотношение $\Delta y_i(k) = \Delta y_j(k) \quad \forall k \in [k_0, k_1]$. На основании этого соотношения и структуры MLN-модели получается равенство

$$G[\cdot]\Delta y_i(k) + F_i[\cdot]\Delta \lambda_i = G[\cdot]\Delta y_i(k) + F_j[\cdot]\Delta \lambda_j.$$

Первые слагаемые в обеих частях этого равенства одинаковы. Сократив их, имеем такое соотношение для характеристических векторов:

$$F_i[\cdot]\Delta \lambda_i = F_j[\cdot]\Delta \lambda_j.$$

Это соотношение отражает факт линейной зависимости характеристических векторов во всех попарных сочетаниях. Полученный вывод соответствует заключению теоремы.

Достаточность. Из заключения теоремы следует, что для линейно зависимых в попарных сочетаниях характеристических векторов справедливо равенство $F_i[\cdot]\Delta \lambda_i = F_j[\cdot]\Delta \lambda_j$. Выразив характеристические векторы из соответствующих выражений для MLN-моделей и подставив их в равенство, получим

$$\Delta y_i(k+1) - G[\cdot]\Delta y_i(k) = \Delta y_j(k+1) - G[\cdot]\Delta y_j(k).$$

Из этого нового равенства следует, что $\Delta y_i(k) = \Delta y_j(k)$. А это, согласно лемме 3.3, означает полную недиагностируемость системы, что соответствует условию теоремы. Теорема доказана.

В классе динамических систем с гладкими нелинейностями можно выделить класс, отличительной особенностью которого является возможность представления характеристического вектора $F_i[\cdot]$ в виде произведения матрицы M_i , составленной из коэффициентов чувствительности к i -му диагностическому параметру, и вектора $\omega(k)$, включающего в себя функции от сигналов системы. При такой форме записи матрица M_i отражает структурные

свойства объекта относительно признака $\Delta \lambda_i$, а вектор $\omega(k)$ характеризует сигналы объекта. Поэтому для такого подкласса динамических систем с гладкими нелинейностями возможна раздельная оценка структурных и сигнальных свойств. Рассмотрим следствия из приведенных теорем.

Согласно теореме 3.7, для полной диагностируемости системы необходимо и достаточно, чтобы во всех попарных сочетаниях выполнялось неравенство

$$F_i[\cdot]\Delta \lambda_i \neq F_j[\cdot]\Delta \lambda_j,$$

или, в новых обозначениях,

$$M_i \omega(k) \Delta \lambda_i \neq M_j \omega(k) \Delta \lambda_j. \quad (3.13)$$

Последнее неравенство представим в форме

$$(M_i \Delta \lambda_i - M_j \Delta \lambda_j) \omega(k) \neq 0. \quad (3.14)$$

Это неравенство выполняется при следующих условиях: 1) матрица $(M_i \Delta \lambda_i - M_j \Delta \lambda_j) \neq 0$; 2) составной вектор $\omega(k) \neq 0$; 3) в матрице неравенства (3.14) есть хотя бы одна строка, не ортогональная вектору $\omega(k)$. Выполнение условия 1 означает структурную диагностируемость системы, которая определяется с помощью следствия.

Следствие 3.7 (критерий полной структурной диагностируемости). Динамическая система с гладкими нелинейностями полностью структурно диагностируема в малом, если и только если матрицы M_i , $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях. Обозначим матрицы структурно диагностируемой системы как M_i^* . Выполнение условий 2 и 3 обеспечивает сигнальную диагностируемость.

Следствие 3.8 (критерий полной сигнальной диагностируемости). Динамическая система с гладкими нелинейностями, полностью структурно диагностируемая, будет полностью сигнально диагностируема в малом, если и

только если векторы $M_i^* \omega(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Из теоремы 3.8 следуют такие критерии оценки структурных и сигнальных свойств.

Следствие 3.9 (критерий частичной структурной диагностируемости). Динамическая система с гладкими нелинейностями частично структурно диагностируема в малом, если и только если среди всех попарных сочетаний матриц M_i , $i = \overline{1, \mu}$ найдется хотя бы одна линейно зависимая пара, а все остальные матрицы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Следствие 3.10 (критерий частичной сигнальной диагностируемости). Динамическая система с гладкими нелинейностями, полностью структурно диагностируемая, будет частично сигнально диагностируема в малом, если и только если среди попарных сочетаний векторов $M_i^* \omega(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ найдется хотя бы одна пара линейно зависимых векторов, а все остальные векторы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Теорема 3.9 дает возможность получить следующие критерии.

Следствие 3.11 (критерий полной структурной недиагностируемости). Динамическая система с гладкими нелинейностями полностью структурно недиагностируема в малом, если и только если матрицы M_i , $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях.

Следствие 3.12 (критерий полной сигнальной недиагностируемости). Динамическая система с гладкими нелинейностями, полностью структурно диагностируемая, будет полностью сигнально недиагностируема в малом, если и только если векторы $M_i^* \omega(k)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях.

Качественная оценка степени диагностируемости динамических систем с гладкими нелинейностями оценивается с помощью индекса структурной диагностируемости (3.9) и индекса сигнальной диагностируемости (3.10).

Пример 3.2. Исследуем диагностируемость нелинейных динамических моделей, описывающих трехбачковый объект примера 2.2. Для физических отказов, характеризующихся диагностическими параметрами $q_1, q_2, q_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3$, характеристические векторы $F_i[\cdot]$ имеют следующую структуру:

$$\begin{aligned} q_1 : F_1[\cdot] &= \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2g(h_1 - h_2)}}{Q_1} \\ \frac{\sqrt{2g(h_1 - h_2)}}{Q_2} \\ 0 \end{bmatrix}; & q_2 : F_2[\cdot] &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\sqrt{2g(h_2 - h_3)}}{Q_2} \\ \frac{\sqrt{2g(h_2 - h_3)}}{Q_3} \end{bmatrix}; \\ q_3 : F_3[\cdot] &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\sqrt{2g(h_3 - H)}}{Q_3} \end{bmatrix}; & \delta_1 : F_4[\cdot] &= \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2gh_1}}{Q_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \delta_2 : F_5[\cdot] &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\sqrt{2gh_2}}{Q_2} \\ 0 \end{bmatrix}; & \delta_3 : F_6[\cdot] &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\sqrt{2gh_3}}{Q_3} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Структура характеристических векторов такая, что возможно их представление в виде произведения матрицы M_i на вектор $\omega(k)$. Матрицы M_i будут иметь такой вид:

$$\begin{aligned}
M_1 &= \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2g}}{Q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{2g}}{Q_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{2g}}{Q} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{2g}}{Q_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{2g}}{Q_3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
M_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2g}}{Q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2g}}{Q_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2g}}{Q_3} \end{bmatrix}.
\end{aligned} \quad (3.16)$$

Вектор сигналов будет описываться функциями

$$\omega^T(k) = [\sqrt{h_1 - h_2} \quad \sqrt{h_2 - h_3} \quad \sqrt{h_3 - H} \quad \sqrt{h_1} \quad \sqrt{h_2} \quad \sqrt{h_3}]. \quad (3.17)$$

Для оценки структурных свойств системы требуется проанализировать $p = C_6^2 = 15$ попарных сочетаний матриц M_i , $i = \overline{1,6}$. Если сравнивать матрицы между собой по структуре, то очевидно, что среди них нет одинаковых, следовательно, матрицы линейно независимы во всех попарных сочетаниях. Значит, $q' = 0$, а индекс структурной диагностируемости $\rho' = p = 15$, т.е. анализируемая система полностью структурно диагностируема в малом.

Оценим теперь степень сигнальной диагностируемости. Для этого сформируем векторы $M_i \omega(k)$, $i = \overline{1,6}$, используя матрицы (3.16) и вектор (3.17). В результате получим векторы, по сути такие же, как и векторы (3.15). Визуальный анализ структуры этих векторов показывает, что все они различны, а это означает, что в пятнадцати попарных сочетаниях будет линейная независимость. Следовательно, $q'' = 0$, а индекс диагностируемости $\rho'' = p = 15$, что свидетельствует о полной диагностируемости анализируемой системы в переходном режиме. Векторная характеристическая функция $M_i^* \omega(k)$ для BSN-модели представляет собой векторную функцию чувствительности $\varphi_i(k)$. Раз-

личие в структуре векторов (3.15), согласно утверждению 3.1, свидетельствует о полной диагностируемости системы в большом.

В рассмотренном примере для анализа сигнальной диагностируемости объекта по его характеристическим векторам не потребовалось знание конкретных значений сигналов h_1, h_2 и h_3 . Достаточно было лишь знания режима функционирования – переходного, обусловившего такое соотношение между переменными $h_1 > h_2 > h_3 > H$, которое позволило однозначно ответить на вопрос о сигнальной диагностируемости. Свойство предложенных критериев сигнальной диагностируемости распространяется на все классы динамических систем.

Приведенные в этом параграфе результаты исследований позволяют производить анализ диагностируемости динамических систем с гладкими нелинейностями. Вместе с тем этот анализ по сути своей представляет оценку качества построенных для системы под определенную задачу диагностических функциональных моделей, так как используются характеристические векторы, отражающие основное, существенное свойство диагностических моделей независимо от их типа. Для ряда динамических систем оказывается возможным осуществлять раздельную оценку влияния структуры и сигналов системы на общую диагностируемость с помощью соответствующих критериев.

3.4 Диагностируемость динамических систем с существенными нелинейностями

Для исследования диагностических свойств динамических систем с существенными нелинейностями используем диагностическую функциональную модель более общего вида – MLC-модель:

$$\Delta \dot{y}_i(t) = G \Delta y_i(t) + \frac{DH[\lambda_i, \tilde{y}_i(t), U(t)]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i; \quad \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (3.18)$$

Если разделить обе части уравнения (3.18) на $\Delta\lambda_i$ и обозначить $\frac{\Delta y_i(t)}{\Delta\lambda_i}$ как $V_i(t)$, то получим уравнение чувствительности выходного сигнала $\tilde{y}(t)$ относительно параметра отказа λ_i в таком виде:

$$\dot{V}_i(t) = G V_i(t) + \frac{DH[\lambda_i, \tilde{y}_i(t), u(t)]}{\partial \lambda_i}; \quad V_i(t_0) = V_0. \quad (3.19)$$

Из уравнений (3.18) и (3.19) следует, что

$$\Delta y_i(t) = V_i(t) \Delta \lambda_i, \quad (3.20)$$

где $V_i(t)$ — функция чувствительности диагностической MLC-модели. Использование диагностической модели в форме (3.20) позволяет сформулировать ряд теорем.

Теорема 3.10. Динамическая система с существенными нелинейностями полностью диагностируема в малом тогда и только тогда, когда функции чувствительности $V_i(t)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Доказательство этой теоремы аналогично доказательству теоремы 3.1, поэтому здесь не приводится. По этой же причине приведем без доказательства следующие теоремы.

Теорема 3.11. Динамическая система с существенными нелинейностями частично диагностируема в малом тогда и только тогда, когда среди функций чувствительности $V_i(t)$, $i = \overline{1, \mu}$ найдется одно или несколько попарных сочетаний с линейно зависимыми функциями, а во всех остальных сочетаниях функции будут линейно независимы.

Теорема 3.12. Динамическая система с существенными нелинейностями полностью недиагностируема в малом тогда и только тогда, когда функции чувствительности $V_i(t)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях.

Приведенные теоремы показывают, что анализ диагностируемости в малом динамических систем с существенными нелинейностями можно производить с помощью соответствующих функций чувствительности, которые определяются на основании используемой диагностической функциональной модели. Результаты анализа диагностируемости в малом можно в ряде случаев распространить на диагностируемость систем в большом согласно утверждению 3.1.

В описанных результатах для анализа диагностируемости применяются функции чувствительности по соответствующим параметрам. Функции чувствительности зависят от типа используемой диагностической модели, структурных и сигнальных свойств системы, от способа описания существенных нелинейностей. Учет таких особенностей функций чувствительности позволяет получить ряд конструктивных критериев диагностируемости.

3.4.1. Критерии диагностируемости систем по диагностическим моделям во временной области

Представим MLC-модель (2.90) в развернутой форме, в которой не разделяются описания признаков отказов по месту их возникновения. Тогда

$$\begin{aligned} \Delta \dot{y}_i(t) &= G \Delta y_i(t) + \frac{\partial A(\lambda)}{\partial \lambda_i} y(t) \Delta \lambda_i + \frac{\partial B(\lambda)}{\partial \lambda_i} F[\lambda_H, u(t)] \Delta \lambda_i + \\ &+ B(\lambda) \frac{DF[\lambda, u(t)]}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i; \\ \Delta y_i(t_0) &= \tilde{y}_0. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Как следует из уравнения (3.21), обобщенное дифференцирование применимо только к описанию статических нелинейных элементов $F[\lambda, u(t)]$, так как другие составляющие векторной функции $H[\cdot]$ дифференцируются в обычном смысле. Используя принцип независимости действия отказов [54], согласно которому действия каждого отказа можно рассматривать независимо

от действия других, получим характеристики диагностических свойств системы по диагностическим функциональным моделям для "малых" отказов. Характерной особенностью всех типов диагностических моделей является наличие слагаемого с вектором

$$\frac{DH[\lambda, \tilde{y}(t), u(t)]}{\partial \lambda_i} = \frac{\partial A(\lambda)}{\partial \lambda_i} y(t) + \frac{\partial B(\lambda)}{\partial \lambda_i} F[\lambda_H, u(t)] + B \frac{DF[\lambda, u(t)]}{\partial \lambda_i}, \quad (3.22)$$

отражающим существенные особенности системы относительно влияния прямого признака отказа $\Delta \lambda_i$ на косвенный признак $\Delta y_i(t)$. Назовем этот вектор характеристическим и обозначим его как $v_i(t)$. В новых обозначениях диагностическую MLC-модель представим в таком виде:

$$\Delta \dot{y}_i(t) = G \Delta y_i(t) + v_i(t) \Delta \lambda_i; \quad \Delta y_i(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (3.23)$$

Результаты исследования этих моделей приведем в форме соответствующих теорем.

Теорема 3.13. Динамическая система с существенными нелинейностями полностью диагностируема в малом тогда и только тогда, когда характеристические векторы $v_i(t)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Доказательство. Необходимость. Воспользуемся методом доказательства от противного. Допустим, что два любых характеристических вектора $v_i(t)$ и $v_j(t)$ линейно зависимы. Тогда существуют такие числа $\Delta \lambda_i$ и $\Delta \lambda_j$, что $v_i(t) \Delta \lambda_i - v_j(t) \Delta \lambda_j = 0$ или $v_i(t) \Delta \lambda_i = v_j(t) \Delta \lambda_j$. Найдём эти векторы из соответствующих уравнений типа (3.23) и подставим в последнее равенство. В результате получим

$$\Delta \dot{y}_i(t) - G \Delta y_i(t) = \Delta \dot{y}_j(t) - G \Delta y_j(t).$$

Из анализа этого соотношения следует, что $\Delta y_i(t) = \Delta y_j(t)$. Данное равенство, согласно лемме 3.3, означает полную недиагностируемость системы, что противоречит условию теоремы. Полученное противоречие показывает, что

допущение о линейной зависимости двух характеристических векторов неверно, и, следовательно, необходимость доказана.

Достаточность. Предположим, что система полностью недиагностируема. Тогда для двух любых признаков, согласно лемме 3.3, справедливо равенство $\Delta y_i(t) = \Delta y_j(t)$, которое выполняется и для производных признаков $\Delta \dot{y}_i(t) = \Delta \dot{y}_j(t)$. Выразим компоненты этого равенства, воспользовавшись структурой уравнения (3.23), в результате чего получим

$$G \Delta y_i(t) + v_i(t) \Delta \lambda_i = G \Delta y_i(t) + v_j(t) \Delta \lambda_j.$$

Сократив в обеих частях одинаковое слагаемое $G \Delta y_i(t)$, имеем новое равенство

$$v_i(t) \Delta \lambda_i = v_j(t) \Delta \lambda_j,$$

из которого следует, что характеристические векторы $v_i(t)$ и $v_j(t)$ линейно зависимы. Линейная зависимость характеристических векторов противоречит заключению теоремы, следовательно, предположение о недиагностируемости ложно, и достаточность доказана.

Теорема 3.14. Динамическая система с существенными нелинейностями частично диагностируема в малом тогда и только тогда, когда среди характеристических векторов $v_i(t)$, $i = \overline{1, \mu}$ найдется хотя бы одна пара с линейно зависимыми векторами, а все остальные векторы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Теорема 3.15. Динамическая система с существенными нелинейностями полностью не диагностируема в малом тогда и только тогда, когда во всех попарных сочетаниях характеристические векторы $v_i(t)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы.

Доказательство этих теорем производится таким же способом, как и аналогичных теорем п. 3.3, и поэтому здесь не приводится. Все приведенные

теоремы по сути дают конструктивные критерии для оценки диагностируемости систем с помощью характеристических векторов.

По аналогии с ранее рассмотренным выделением из характеристического вектора структурных и сигнальных характеристик системы представим $v_i(t)$ исходя из (3.22) в форме

$$v_i(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial A(\lambda)}{\partial \lambda_i} & \frac{\partial B(\lambda)}{\partial \lambda_i} & B \frac{DF[\lambda, u(t)]}{\partial \lambda_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(t) \\ F[\lambda_H, u(t)] \\ 1 \end{bmatrix} = N_i \omega(t), \quad (3.24)$$

где N_i – матрица, отражающая структурные свойства системы; $\omega(t)$ – вектор, характеризующий сигнальные свойства.

Использование данных характеристик позволяет производить раздельную оценку структурных и сигнальных свойств системы. Так, из теоремы 3.13 вытекают такие следствия.

Следствие 3.13 (критерий полной структурной диагностируемости). Динамическая система с существенными нелинейностями полностью структурно диагностируема в малом, если и только если матрицы линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Следствие 3.14 (критерий полной сигнальной диагностируемости). Динамическая система с существенными нелинейностями полностью сигнально диагностируема в малом, если и только если векторы $N_i^* \omega(t)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

В этом следствии матрицы N_i^* соответствуют полностью структурно диагностируемой системе. Рассмотрим следствия теоремы 3.14.

Следствие 3.15 (критерий частичной структурной диагностируемости). Динамическая система с существенными нелинейностями частично структурно диагностируема в малом, если и только если среди всех попарных сочетаний матриц найдется хотя бы одна пара линейно зависимых векторов, а все остальные матрицы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Следствие 3.16 (критерий частичной сигнальной диагностируемости).

Динамическая система с существенными нелинейностями, полностью структурно диагностируемая, будет частично сигнально диагностируема в малом, если и только если среди всех попарных сочетаний векторов найдется хотя бы одна пара линейно зависимых векторов, а все остальные векторы в попарных сочетаниях будут линейно независимы.

Следующие критерии вытекают из теоремы 3.15.

Следствие 3.17 (критерий полной структурной недиагностируемости).

Динамическая система с существенными нелинейностями полностью структурно недиагностируема в малом, если и только если матрицы N_i , $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях.

Следствие 3.18 (критерий полной сигнальной недиагностируемости).

Динамическая система с существенными нелинейностями, полностью структурно диагностируемая, будет полностью сигнально недиагностируема в малом, если и только если векторы $N_i^* \omega(t)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях.

Для количественной оценки степени диагностируемости используются соответствующие индексы (3.9) и (3.10).

Пример 3.3. Проанализируем диагностируемость релейной системы стабилизации космического корабля по каналу крена (см. пример 2.3). На основании MLC-моделей (2.94) и (2.95) для параметров $K_\phi, K_{\dot{\phi}}, a, b$ и P_1 сформируем векторы $v_i(t)$, так как диагностические модели описывают тестовый режим функционирования системы и раздельное рассмотрение структурных и сигнальных свойств невозможно. Поэтому

$$K_{\phi} : v_1(t) = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{U}_{\phi}(t)}{K_{\phi}} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad K_{\phi} : v_2(t) = \begin{bmatrix} -\frac{K_{\phi}}{K_{\phi}^2} U_{\phi}(t) \\ \frac{1}{I_x} P_1 [h(t-b) - h(t-2U_{\max} + a)] \end{bmatrix};$$

$$a : v_3(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_{\phi}}{I_x} P_1 \delta(t-2U_{\max} + a) \end{bmatrix};$$

$$b : v_4(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{\phi}}{I_x} P_1 \delta(t-b) \end{bmatrix};$$

$$P_1 : v_5(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{\phi}}{I_x} [h(t-b) - h(t-2U_{\max} + a)] \end{bmatrix}.$$

Структура векторов $v_1(t)$ и $v_2(t)$ отличается от структуры других векторов, поэтому такая их особенность во всех сочетаниях обеспечит линейную независимость с другими векторами. Анализ попарных сочетаний трех последних векторов свидетельствует о линейной независимости векторов в парах. Следовательно, во всех попарных сочетаниях характеристические функции линейно независимы, в связи с чем, согласно теореме 3.13, система стабилизации полностью диагностируема на основании MLC-моделей. Отказы системы с параметрами K_{ϕ} и K_{ϕ} диагностируемы в большом.

Рассмотренные в параграфе критерии структурной и сигнальной диагностируемости применимы для систем, статические существенные нелинейности которых описываются вне зависимости от формы управляющего воздействия. Это, как правило, нелинейные элементы с однозначными статическими характеристиками, не зависящими от направления изменения входных сигналов. Оценка диагностируемости объектов, содержащих нелинейные элементы с петлевыми, неоднозначными статическими характеристиками (к примеру, характеристики гистерезиса, сухого трения,

зазора, релейные и т.п.), может проводиться интегрально с использованием векторных функций чувствительности $V_i(t)$ и характеристических векторов $v_i(t)$ в соответствии с теоремами.

3.4.2. Критерии диагностируемости систем по операторным моделям

Для изложения основных результатов диагностируемости используем более общий вид операторных диагностических моделей – MLC-модель при нулевых начальных условиях:

$$\Delta Y_i(s) = [Is - G]^{-1} \frac{\partial H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}_i(s), U(s), s]}{\nabla \lambda_i} \Delta \lambda_i. \quad (3.25)$$

Разделив обе части операторного уравнения на признак отказа $\Delta \lambda_i$ с использованием нового обозначения, получим

$$V_i(s) = [Is - G]^{-1} \frac{\partial H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}_i(s), U(s), s]}{\nabla \lambda_i}, \quad (3.26)$$

где $V_i(s)$ - изображение функции чувствительности для MLC-модели. Функция чувствительности для каждого типа операторных диагностических моделей будет описываться соответствующими операторными уравнениями. При использовании MDC-моделей функция чувствительности представляется следующим выражением:

$$V(s) = [Is - A]^{-1} \frac{\partial H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}_i(s), U(s), s]}{\nabla \lambda_i}. \quad (3.27)$$

Для MSC-моделей функция чувствительности имеет вид

$$V(s) = Is^{-1} \frac{\partial H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}_i(s), U(s), s]}{\nabla \lambda_i}. \quad (3.28)$$

Использование функции чувствительности в операторной форме как характеристики структурных и сигнальных свойств нелинейной динамической системы позволяет представить аналитическую связь между признаками в форме

$$\Delta Y_i(s) = V_i(s) \Delta \lambda_i, \quad (3.29)$$

являющейся наиболее общей формой описания операторных диагностических моделей для "малых" отказов.

Теорема 3.16 (критерий полной диагностируемости). Диагностическая система с существенными нелинейностями полностью диагностируема в малом, если и только если операторные функции чувствительности $V_i(s)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Доказывается теорема так же, как и теорема 3.1.

Теорема 3.17 (критерий частичной диагностируемости). Динамическая система с существенными нелинейностями частично диагностируема в малом, если и только если среди операторных функций чувствительности $V_i(s)$, $i = \overline{1, \mu}$ найдется одно или несколько попарных сочетаний с линейно зависимыми функциями, а во всех остальных попарных сочетаниях функции будут линейно независимы.

Теорема 3.18 (критерий полной недиагностируемости). Динамическая система с существенными нелинейностями полностью недиагностируема в малом, если и только если операторные функции чувствительности $V_i(s)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях.

Доказательство этих теорем производится ранее использованным в п. 3.1 способом.

Оценку степени диагностируемости можно осуществлять не только с помощью операторных функций чувствительности. Анализ приведенных выражений (3.26) - (3.28) показывает, что инвариантной характеристикой операторных функций чувствительности является

$$\Psi_i(s) = \frac{\partial H[\Delta \lambda_i, \tilde{Y}_i(s), U(s), s]}{\nabla \lambda_i}. \quad (3.30)$$

Применение такой характеристики динамической системы с существенными нелинейностями вместо $V_i(s)$ дает возможность пользоваться рассмотренными критериями для анализа диагностируемости в терминах $\Psi_i(s)$.

Чтобы построить машинно-ориентированную процедуру анализа диагностируемости, целесообразно выражения для изображений $V_i(s)$, $\Psi_i(s)$, $\tilde{Y}(s)$ представить в полиномиальной форме относительно переменной s [40]. Для этого показательные функции, присутствующие в выражении компонент, разлагают относительно значения $s=0$ в ряд Тейлора, ограниченный определенным числом слагаемых, и производят деление полинома числителя изображения на полином знаменателя. В полученных таким образом полиномах параметры отказов λ_i входят в коэффициенты. Сформировав из коэффициентов полиномов соответствующие векторы, можно численно реализовать операции взятия частных производных по параметру λ_i , а также анализа полученных выражений на предмет линейной зависимости.

В результате проделанных необходимых преобразований, к примеру, для изображений векторов, измеряемых переменных релейной системы стабилизации (см. пример 2.4), описываемых выражением

$$\begin{bmatrix} \tilde{U}_\phi(s) \\ \tilde{U}_\psi(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_\phi l \\ s^2 I_x \\ K_\psi l \\ s I_x \end{bmatrix} P_1 \frac{e^{-bs} - e^{-(2U_{\max} - a)s}}{s}, \quad (3.31)$$

получим следующее полиномиальное описание, представленное в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \tilde{U}_\phi(s) \\ \tilde{U}_\phi(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_\phi}{I_x} P_1(2U_{\max}-a-b) & -\frac{K_\phi}{I_x} 0,5P_1[(2U_{\max}-a)^2+b^2] & 0 \\ 0 & -\frac{K_\phi}{I_x} P_1(2U_{\max}-a-b) & -\frac{K_\phi}{I_x} 0,5P_1[(2U_{\max}-a)^2+b^2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s^{-2} \\ s^{-1} \\ s^0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

При использовании такой формы записи анализ диагностируемости будет состоять в определении численных значений частных производных матрицы по параметрам отказов, формировании всех попарных сочетаний и выявлении пар с линейно зависимыми матрицами.

Рассмотренные методы оценки степени диагностируемости систем основывались на применении таких характеристик, как $V_i(s)$, $\Psi_i(s)$, $\tilde{Y}(s)$. Критерии диагностируемости могут быть построены с помощью передаточной функции $W(s)$ (2.99) разомкнутой системы. С этой целью определяются частные производные $\frac{\partial W(s)}{\partial \lambda_i}$, $i = \overline{1, \mu}$, а затем анализируется их зависимость в попарных сочетаниях. Если $W(s)$ представить в полиномиальной форме, описанной ранее, то процедура анализа может быть реализована в виде машинной программы.

Пример 3.4. Произведем оценку диагностируемости релейной системы стабилизации (см. пример 2.4) с помощью характеристик $\Psi_i(s)$. Такие характеристики могут быть определены из диагностических операторных моделей, а также по уравнению возмущенного движения с помощью выражения

$$\Psi_i(s) = \frac{\partial A(\lambda)}{\partial \lambda_i} Y(s) + \frac{\partial B(\lambda)}{\partial \lambda_i} F[\lambda, s] + B \frac{DF[\lambda, s]}{\partial \lambda_i} \quad (3.33)$$

Изображение выходного сигнала релейного исполнительного элемента при использовании тестового треугольного сигнала (рис. 2.11) имеет следующий вид:

$$F[a, b, S] = P_1 \frac{e^{-bs} - e^{-(2U_{\max}-a)s}}{s} \quad (3.34)$$

Используя матрицы $A(\lambda)$ и $b(\lambda)$ из уравнения (2.92) и изображения (3.34), с помощью формулы (3.33) получим такие характеристики $\Psi_i(s)$ для диагностических параметров отказов:

$$\begin{aligned} K_\phi : \Psi_1(s) &= \begin{bmatrix} \tilde{U}_\phi(s) \\ K_\phi \\ 0 \end{bmatrix}; \quad K_\phi : \Psi_2(s) = \begin{bmatrix} -\frac{K_\phi}{K_\phi^2} U_\phi(s) \\ \frac{IP_1[e^{-bs} - e^{-(2U_{\max}-a)s}]}{I_x s} \end{bmatrix}; \\ a : \Psi_3(s) &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_\phi IP_1 e^{-(2U_{\max}-a)s}}{I_x} \end{bmatrix}; \quad b : \Psi_4(s) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_\phi IP_1 e^{-bs}}{I_x} \end{bmatrix}; \\ P_1 : \Psi_5(s) &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_\phi [e^{-bs} - e^{-(2U_{\max}-a)s}]}{I_x s} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Анализ всех попарных сочетаний характеристик $\Psi_i(s)$, $i = \overline{1, 5}$ свидетельствует об их линейной независимости. Следовательно, согласно теореме 3.16, исследуемая система полностью диагностируема в малом относительно отказов, описываемых параметрами K_ϕ, K_ϕ, a, b и P_1 , и в большом относительно параметров K_ϕ и K_ϕ в соответствии с утверждением 3.1.

Приведенные в этом параграфе критерии дают возможность оценивать диагностируемость систем с помощью определенных характеристик операторных диагностических моделей.

3.5. Пути обеспечения диагностируемости систем

Рассмотренные в предыдущих параграфах критерии позволяют оценивать степень диагностируемости объектов исследования, описываемых в различных классах динамических систем. Все множество возможных состояний по диагностируемости систем представлено тремя подмножествами: 1) подмножество полностью диагностируемых систем; 2) подмножество частично диагностируемых систем; 3) подмножество полностью недиагностируемых систем. Системы, входящие в первое подмножество, — это системы с полной структурной и сигнальной диагностируемостью, т.е. обладающие необходимыми и достаточными условиями для построения эффективных процедур их диагностирования. Естественно, что диагностические системы других подмножеств такими условиями не обладают, и для них не могут быть разработаны алгоритмы диагностирования. Рассмотрим практические возможности перевода систем этих подмножеств в подмножество полностью диагностируемых.

Как было установлено ранее, диагностируемость зависит как от структурных свойств динамической системы, так и от свойств ее сигналов. Необходимым условием полной диагностируемости системы является ее полная структурная диагностируемость. Анализ структурных свойств рассмотренных классов динамических систем производится с использованием соответствующих классу матриц коэффициентов чувствительности L_i , M_i и N_i для исследования во всех $p = C_{\mu}^2$ попарных сочетаниях.

В результате анализа конкретной системы возможен любой из следующих трех исходов: 1) все матрицы коэффициентов чувствительности системы во всех попарных сочетаниях линейно независимы, т.е. индекс структурной диагностируемости максимальный: $\rho' = p$; 2) среди матриц коэффициентов чувствительности есть линейно зависимые в одном или нескольких попарных сочетаниях, т.е. $q' \geq 1$, значит, индекс структурной диагностируемости $1 \leq \rho' \leq p-1$, и система частично структурно

диагностируема; 3) все матрицы коэффициентов чувствительности во всех попарных сочетаниях линейно зависимы, следовательно, $\rho' = 0$, что означает полную структурную недиагностируемость исследуемой системы.

Первый исход является благополучным, так как представляет выполнение необходимых условий полной диагностируемости. Второй и третий исходы — неблагоприятные. При таких исходах для формирования необходимых условий диагностируемости возможны следующие практические пути. Первый. Декомпозиция исходной системы на полностью структурно диагностируемые подсистемы. Второй. Изменение структуры исходной диагностической системы посредством введения избыточности. Третий. Комплексный путь, состоящий в компромиссном использовании декомпозиции и изменения структуры системы.

Рассмотрим суть каждого пути. Первый путь обеспечения структурной диагностируемости связан с введением контрольных точек, основанных на организации физически осуществимых и доступных измерению внутренних сигналов системы, и преобразовании их в форму, удобную для последующей обработки, как правило, в форму цифрового кода вычислительной машины, используемой для обработки информации в целях диагностирования системы. Количество контрольных точек устанавливается по результатам анализа структурной диагностируемости. Так, если установлено, что $q' = 1$, то необходима одна контрольная точка; если $q' = 3$, то требуется две контрольные точки, и т.д. Исследование этой закономерности привело к следующим выводам. Количество контрольных точек l связано с количеством структурно неразличимых признаков отказов μ' соотношением

$$l = \mu' - 1. \quad (3.36)$$

Определим μ' исходя из q' , значение которого получается в результате анализа структурных свойств. При этом воспользуемся формулой сочетаний C_{μ}^2 , приравняв ее q' , в результате получим уравнение

$$\frac{\mu'(\mu'-1)}{2} = q'. \quad (3.37)$$

После преобразования имеем алгебраическое квадратное уравнение

$$(\mu')^2 - \mu' - 2q' = 0,$$

решение которого в общем виде описывается следующим выражением:

$$\mu'_{1,2} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + 2q'}. \quad (3.38)$$

Итак, в результате решения уравнения получается два значения: μ'_1 и μ'_2 . Поскольку $q' \geq 1$, то значение μ'_2 всегда будет отрицательным и, следовательно, неприемлемым для характеристики количества структурно неразличимых признаков. Поэтому μ' для формулы (3.36) вычисляется так:

$$\mu' = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + 2q'}. \quad (3.39)$$

Подставив выражение μ' в формулу (3.36) после преобразований, получим

$$l = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + 2q'}. \quad (3.40)$$

После установления количества контрольных точек следующий вопрос, волнующий заказчика и разработчика диагностического обеспечения, состоит в том, где, в каких местах системы выводить контрольные точки? Ответ на это в большей степени связан с необходимостью анализа вариантов инженерно-технических решений из экономических соображений. Однако результаты анализа структурной диагностируемости позволяют установить направления формирования вариантов, необходимых для обоснованного принятия решения о выборе контрольных точек. Так, если две матрицы M_i и M_j линейно зависимы, то для различимости признаков λ_i и λ_j необходимо ввести контрольную точку, обеспечивающую раздельную оценку их влияния.

Когда количество и место введения контрольных точек установлены, производится разбиение недиагностируемого фрагмента исходного математи-

ческого описания системы на μ' связанных диагностических моделей, описывающих функционирование μ' подсистем, относительно входных, выходных и внутренних сигналов, используемых для организации контрольных точек. Таким образом, осуществляется декомпозиция исходной системы на ряд взаимосвязанных подсистем с полной структурной диагностируемостью.

Второй путь обеспечения структурной диагностируемости связан с введением избыточности, как правило, приборной и структурной. Введение приборной избыточности способствует не только различимости признаков отказов, но и повышению надежности функционирования элементов. Приборная избыточность вводится с применением принципов резервирования и мажоритирования [87]. В результате таких мер надежность отдельных элементов повышается настолько, что оказывается возможным в ряде практических задач исключить такие элементы из множества ненадежных, а следовательно, сократить множество физических отказов D. Необходимость введения структурной избыточности появляется тогда, когда введение приборной избыточности технически трудновыполнимо (невозможно) или экономически нецелесообразно, а также когда введение контрольных точек связано с постановкой дополнительного датчика к уже имеющимся. В этих случаях для некоторых систем оказывается возможным использовать дополнительный датчик для формирования избыточных связей, не изменяющих функционального назначения системы.

Комплексный, третий путь обеспечения структурной диагностируемости, состоит в использовании как контрольных точек, так и приборной и структурной избыточности. При этом степень компромисса между применением возможных средств устанавливается с использованием либо экспертных методов, либо методов оптимизации по технико-экономическим критериям.

Обеспечив структурную диагностируемость динамической системы, производят анализ ее сигнальных свойств. После установления факта сигнальной недиагностируемости системы требуется произвести выбор ее управляющих либо возмущающих воздействий или начальных условий,

обеспечивающих полную сигнальную диагностируемость. Итак, выбор воздействий на динамическую систему представляет собой выполнение достаточных условий для однозначного установления по результатам косвенных измерений факта наличия всех прямых признаков отказов.

Для выявления сигнальных свойств полностью структурно диагностируемой системы проводится ее анализ с помощью критериев сигнальной диагностируемости. Для анализа рассмотренных классов систем используются соответствующие характеристические векторные функции $L_i^*v(k)$, $M_i\omega(k)$ и $N_i\omega(t)$, сгруппированные в попарные сочетания. В результате анализа может быть установлено следующее: 1) все характеристические векторные функции в попарных сочетаниях линейно независимы, т.е. индекс сигнальной диагностируемости $\rho'' = \rho$, и, следовательно, анализируемая система полностью сигнально диагностируема; 2) среди попарных сочетаний есть одно или несколько таких, в которых характеристические векторные функции линейно зависимы; тогда $q'' \geq 1$, а индекс сигнальной диагностируемости $1 \leq \rho'' \leq \rho - 1$, что означает частичную сигнальную диагностируемость исследуемой системы; 3) во всех попарных сочетаниях характеристические векторные функции линейно зависимы, значит $q'' = \rho$, и тогда $\rho'' = 0$, что свидетельствует о полной сигнальной недиагностируемости рассматриваемой системы.

Вывод о полной сигнальной диагностируемости системы, полученный в результате анализа ее сигнальных свойств, свидетельствует о достаточных информационных свойствах сигналов для однозначного выявления признаков отказов.

Для обеспечения полной сигнальной диагностируемости систем при других результатах анализа требуется выбрать такие воздействия, которые бы обеспечили линейную независимость соответствующих пар характеристических векторных функций. Рассмотрим возможность такого выбора на примере управляющего воздействия. От выбора вектора

управляющих воздействий, обеспечивающего полную сигнальную диагностируемость, зависит режим функционирования объекта, а следовательно, и режим диагностирования. Поэтому для обеспечения соответствующих сигнальных свойств возможен выбор таких режимов диагностирования: 1) тестового; 2) рабочего; 3) комбинированного.

Тестовый режим диагностирования, или тестовое диагностирование, характеризуется подачей на систему специально организованных определенной формы и длительности управляющих воздействий – тестовых воздействий. Рабочий режим диагностирования (рабочее диагностирование) осуществляется при подаче рабочих управляющих воздействий, т.е. воздействий, при которых обеспечивается выполнение функционального назначения системы. В тех случаях, когда полного диагностирования системы невозможно достичь использованием только одного из названных режимов, применяется комбинированный режим диагностирования, или комбинированное диагностирование. Характерной особенностью этого вида диагностирования является совместное использование как тестовых, так и рабочих воздействий. Причем под совместным использованием понимается как одновременное применение суммы рабочих и тестовых воздействий, так и раздельная подача их на заданном интервале диагностирования $[k_0, k_1]$.

Важным моментом при выборе тестовых воздействий является формирование их длительности, обеспечивающей полную диагностируемость на заданном интервале $[k_0, k_1]$. Поэтому из условия линейной независимости характеристических векторных функций выбирается не только форма тестовых воздействий, но и их длительность.

При практическом обеспечении диагностируемости систем возникает ряд задач. Сформулируем несколько практических задач и покажем пути их решения. При этом будем оперировать следующими характеристиками объекта диагностирования:

1. Множество прямых диагностических параметров отказов λ_i , $i = \overline{1, \mu}$, выбранных таким образом, чтобы однозначно характеризовать каждый вид отказа из заданного множества D .

2. Вектор измеряемых переменных технического состояния $\tilde{y}(k)$, сформированный на первом этапе исходя из общетехнических соображений доступности измерению переменных и практической целесообразности этих измерений.

3. Диагностические модели для "малых" отказов.

4. Характер управляющих воздействий: тестовые и рабочие.

В зависимости от того, какую характеристику или свойство системы требуется определить, все возникающие на практике задачи можно расклассифицировать следующим образом.

А-задача. Известны множество признаков отказов, вектор измеряемых переменных $\tilde{y}(k)$, характер управляющих воздействий, диагностические модели. Требуется установить, будет ли система полностью диагностируема.

ВФ-задача. Особенность этой задачи состоит в том, что на основании известных вектора измерений $\tilde{y}(k)$ и диагностических моделей следует определить множество видов отказов, диагностируемых в режиме ее функционирования.

ВТ-задача. Задача этого класса объединяет такие постановки, когда необходимо выявить множество видов отказов, полностью диагностируемых при заданных тестовых воздействиях. Исходными данными являются: вектор измеряемых переменных, диагностические модели, тестовые воздействия.

СФ-задача. Эта задача состоит в определении вектора измеряемых переменных $\tilde{y}(k)$, обеспечивающего полную диагностируемость функционирующей системы в отношении заданного множества параметров отказов λ_i , $i = \overline{1, \mu}$.

СТ-задача. Суть этой задачи заключается в формировании вектора измеряемых переменных для полной диагностируемости относительно известного множества параметров отказов системы при заданных тестовых воздействиях.

СФ- и СТ-задачи в какой-то степени сходны с известными в литературе задачами формирования или выбора контрольных точек (контролируемых показателей) [19, 47, 92, 97].

КФ-задача. На основании известных множества признаков отказов λ_i , $i = \overline{1, \mu}$, вектора измеряемых переменных $\tilde{y}(k)$ и диагностических моделей системы требуется определить при рабочих управляющих воздействиях режим ее функционирования: переходный, установившийся или любой, при котором система полностью диагностируема.

КТ-задача. Выбрать тестовые управляющие воздействия, обеспечивающие полную диагностируемость по доступным измерениям переменным $\tilde{y}(k)$.

Рассмотрим возможные пути решения сформулированных задач.

А-задача возникает в практической деятельности, когда на эвристической основе сформированы основные характеристики объекта диагностирования и требуется проверка правильности предположения о полной диагностируемости, т.е. необходимо решить задачу анализа. При этом целесообразно применять критерии диагностируемости, использующие функции чувствительности и характеристические векторные функции.

На практике ВФ- и ВТ-задачи возникают на начальном этапе разработки технической СУ при определении путей обеспечения заданного уровня надежности и безопасности. Решение этих задач позволяет выявить подмножество видов отказов, которые полностью диагностируемы, а также подмножество видов отказов, которое не может быть диагностировано в заданных условиях. Для исключения или уменьшения влияния видов отказов из второго подмножества могут применяться различные методы мажоритирования, резервирования. В инженерной практике задача

формирования подмножеств диагностируемых и недиагностируемых видов отказов всегда решается итерационным путем на компромиссной основе. Задача оценки полученных решений сводится, как правило, к задачам ВР и ВТ. Для решения этих задач предпочтительнее использовать функции чувствительности $\varphi_i(k), V_i(s)$ диагностических моделей или их характеристические векторные функции.

СР- и СТ-задачи возникают в практике проектирования СУ при разработке диагностического обеспечения для потенциального множества отказов, при создании систем управления с активной отказоустойчивостью, при формировании объемов телеметрической информации для контроля и диагностирования автономных объектов, при решении эксплуатационных задач по обслуживанию технических систем и в ряде других инженерных разработок [14, 15, 36 – 39, 78]. Очевидно, что задачи СР и СТ являются задачами, освобожденными от второстепенных особенностей конкретных постановок и решаемыми на начальных этапах проектирования СУ. Метод решения этих задач основан на использовании критериев частичной структурной диагностируемости и критериев сигнальной диагностируемости.

Задачи типа КР и КТ связаны с выбором характера управляющих воздействий. Такие задачи возникают на практике, когда есть возможность выбора управляющих воздействий или необходим аргументированный выбор тестового или функционального режима диагностирования. Очевидно, что объект диагностирования в таких задачах должен быть полностью структурно диагностируем. Для решения КР- и КТ-задач используются критерии сигнальной диагностируемости.

Рассмотренные в этом параграфе возможные пути обеспечения диагностируемости динамических систем свидетельствуют как о конструктивизме предложенных критериев диагностируемости, так и о необходимости разработки машинно-ориентированных методов и программных модулей анализа свойств построенных диагностических функциональных моделей СУ.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования по теме данной главы позволили разработать основы теории диагностируемости динамических систем. Основные результаты заключаются в следующем:

1. Даны, исходя из концепции диагностических моделей, базовые определения диагностируемости динамических систем, сформулированы и доказаны основные леммы и теоремы о диагностируемости систем в малом, определены условия диагностируемости систем в большом.
2. Для класса линейных динамических систем сформулирован и доказан ряд теорем, позволивших получить конструктивные критерии общей, структурной и сигнальной диагностируемости в малом путем использования специфических характеристик линейных диагностических моделей.
3. Предложены и обоснованы подходы для анализа диагностируемости класса динамических систем с гладкими нелинейностями. Получены критерии оценки степени общей диагностируемости в малом с использованием характеристических векторных функций диагностических моделей, а также выведены критерии для раздельной оценки структурных и сигнальных свойств систем.
4. Сформулированы и доказаны теоремы диагностируемости для класса динамических систем с существенными нелинейностями. Получены критерии диагностируемости в малом с использованием временных и операторных характеристик диагностических моделей для оценки их общих, а также структурных и сигнальных свойств.
5. Определены пути обеспечения полной диагностируемости динамических систем. Приведены основные практические задачи по диагностируемости систем и предложены способы их решения на основе использования полученных критериев анализа свойств диагностических моделей.

ГЛАВА 4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУ

Возникновение в СУ любого вида отказа d_i из заданного множества D представляет собой неопределенное событие с точки зрения момента его появления, места возникновения, принадлежности к какому-то классу конкретного вида проявления. Снятие неопределенности этого события связано с нахождением его соответствующих характеристик на основании доступных измерению косвенных признаков системы. Вычисление таких характеристик возможно на основе системного сигнально-параметрического подхода путем решения следующих основных задач диагностирования: обнаружение отказов, поиск места их возникновения, установление класса отказа и определение его вида. Результаты решения основных задач должны быть представлены в форме машинно реализуемых алгоритмов, а весь процесс диагностирования СУ – в форме дерева поиска, являющегося основой для создания базы знаний и машины логического вывода знаниеориентированных компьютерных систем.

4.1. Обнаружение отказов

Для определения момента времени появления отказа или установления факта его наличия необходимо осуществлять контроль косвенных диагностических признаков системы. При этом факт появления отказа устанавливается, когда текущие значения признаков выйдут за допустимые пределы изменения, а факт наличия отказа определяется, если значение признаков находятся за пределами допуска. Такова содержательная суть обнаружения отказов в динамических системах. В любой процедуре обнаружения отказов, или, используя распространенный термин, контроля [19, 23, 24, 91, 92, 97, 112, 122, 132, 136] присутствуют в той или иной форме следующие элементы: 1) воспроизведение эталонного поведения контролируемых переменных; 2) сравнение контролируемых переменных

системы с эталонными; 3) формирование допусков для результатов сравнения; 4) классификационная обработка результатов сравнения. Условно процедуру обнаружения отказов можно представить с помощью функциональной схемы (рис. 4.1). Воспроизведение эталонного поведения $\hat{y}(k)$ динамической системы (ДС) осуществляется с помощью эталонной модели (ЭМ) на основании сигналов $u(k)$ и $\hat{y}(k)$. По разностному сигналу $\Delta y(k)$ производится классификационная обработка (КО) относительно сформированных в ФД допусков. Результаты классификации могут представляться в форме "годен - негоден", "да - нет", "выше- норма - ниже", "норма- "малый" отказ- "большой" отказ" и др.

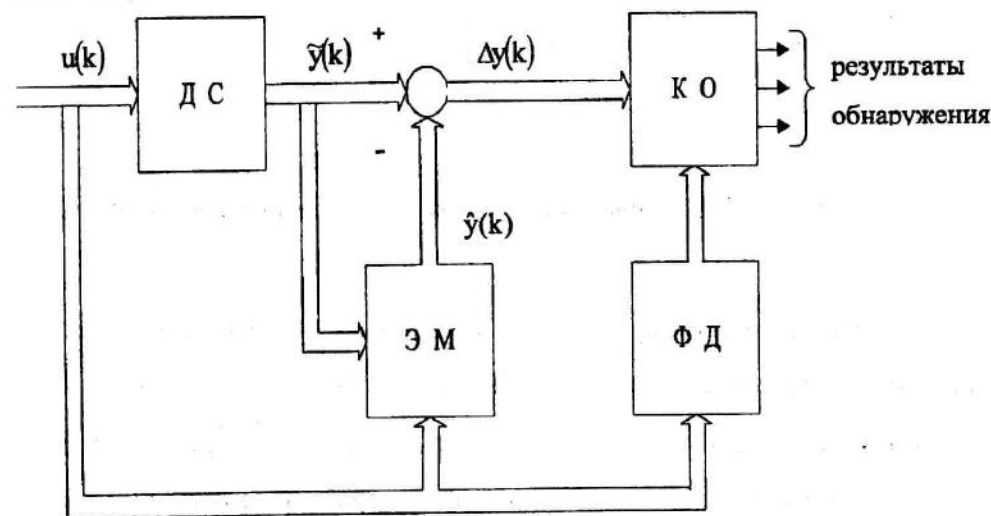


Рис. 4.1. Схема процедуры обнаружения отказов

Выходной сигнал элемента сравнения есть не что иное, как косвенный диагностический признак динамической системы. При построении диагностических функциональных моделей (см. гл. 2) используются различные эталонные модели, относительно которых определялось дополнительное возмущенное движение, вызванное i -м признаком отказа. Совокупность таких функциональных элементов на рис. 4.1, как ДС, ЭМ и элемент сравнения, представляет собой развернутое графическое изображение обобщенной диагностической

функциональной модели. С учетом этого факта схему обнаружения отказов можно представить так, как показано на рис. 4.2.

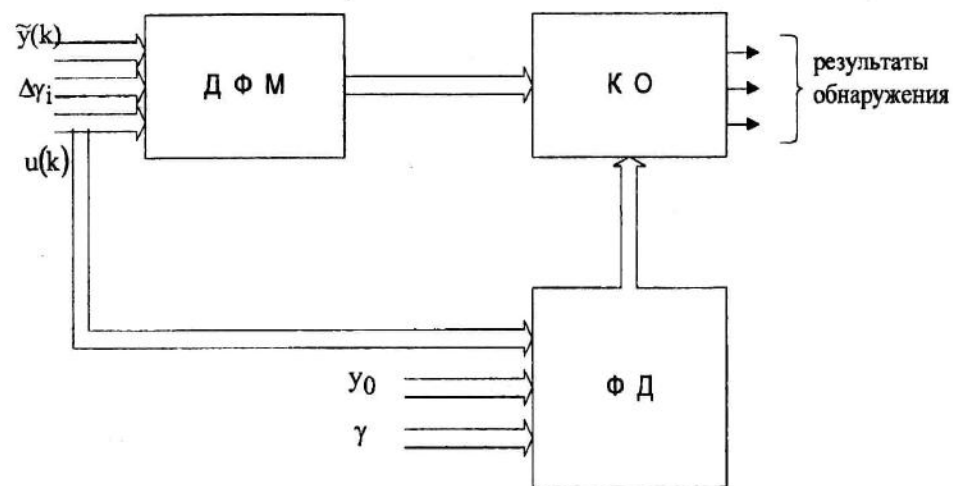


Рис. 4.2. Схема обнаружения отказов с использованием ДФМ

В общем случае вектор косвенных признаков $\Delta y(k)$ зависит от вектора управляющих воздействий системы $u(k)$, вектора возмущенного движения системы $\tilde{y}(k)$, прямых признаков появления отказов $\Delta \gamma_i, i = \overline{1, \mu}$, ненулевых начальных условий y_0 , вектора диагностических параметров появления отказов γ с учетом их разброса, т. е.

$$\Delta y(k) = f[u(k), \tilde{y}(k), \Delta \gamma_i, y_0, \gamma]. \quad (4.1)$$

Вектор косвенных признаков $\Delta y(k)$ может содержать избыточное количество компонент, необходимых для обнаружения любого вида отказа из заданного множества $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$. На первом этапе разработки процедур обнаружения наиболее целесообразно выбрать оптимальную совокупность контролируемых признаков $\Delta y_0(k)$.

Для оперативного и достоверного обнаружения отказов в динамической системе важно, чтобы из оптимального вектора косвенных признаков $\Delta y_0(k)$ была извлечена информация о влиянии признаков появления отказов $\Delta \gamma_i, i = \overline{1, \mu}$. Для получения этой информации требуется сформировать допуски на $\Delta y_0(k)$ или, в общем случае, на показатель качества $I[\Delta y_0(k)]$ в зависимости от $u(k), y_0, \gamma$.

Классификационная обработка текущего значения $\Delta y_0(k)$ в простейшем случае осуществляется путем его сравнения с допуском. Так, если установлена нижняя Δ_1 и верхняя Δ_2 границы допустимого изменения вектора $\Delta y_0(k)$, то обнаружение отказов в системе может проводиться по правилу, описываемому предикатным уравнением:

$$(\phi[\Delta y_0(k)] > 0) = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta y_0(k) \in [\Delta_1, \Delta_2]; \\ 0, & \text{если } \Delta y_0(k) \notin [\Delta_1, \Delta_2], \end{cases} \quad (4.2)$$

или по правилу трехзначной градации вида

$$\phi[\Delta y_0(k)] = \begin{cases} \text{выше,} & \text{если } \Delta y_0(k) > \Delta_2; \\ \text{норма,} & \text{если } \Delta y_0(k) \in [\Delta_1, \Delta_2]; \\ \text{ниже,} & \text{если } \Delta y_0(k) < \Delta_1. \end{cases} \quad (4.3)$$

По аналогии с правилом трехзначной градации можно записать правило n -значной градации. Следует отметить, что основная цель обнаружения отказов состоит в установлении фактов появления и наличия отказов в динамической системе, поэтому целесообразным является использование правила классификации (4.2).

Таким образом, основными задачами при обнаружении отказов в динамических системах являются:

- 1) выбор оптимальной совокупности контролируемых косвенных признаков системы;
- 2) формирование диапазона допустимых изменений показателя качества;
- 3) разработка классификационных процедур обработки, позволяющих установить факты появления и наличия отказов.

Решение трех перечисленных задач позволяет синтезировать различные структуры алгоритмов обнаружения отказов [66]. При решении конкретной задачи обнаружения отказов необходимо вводить ряд дополнительных требований, вытекающих из условий задачи, которые позволяют осуществить целенаправленный выбор из множества возможных структур наиболее приемлемой. Рассмотрим возможные методы решения этих задач.

Косвенные признаки отказов могут выбираться по различным критериям, учитывающим информационные свойства признаков [92], технико-экономические затраты [19, 92], вероятностные характеристики [19] и другие оценки признаков. При этом удастся сформировать оптимальные или близкие к ним совокупности признаков. Вместе с тем более естественным подходом к выбору признаков на первом этапе проектирования диагностического обеспечения является инженерный подход, основанный на более простых критериях и допущениях, учитывающий лишь структуру диагностических признаков для отказов из заданного множества D . В его основе лежит предположение о равновероятности появления признаков отказов, что следует из пуассоновского потока отказов в реальных системах [4], а также допущения о равноценности диагностических признаков с точки зрения количества информации и затрат на их контроль, что обусловлено требованиями безопасности и живучести систем [85]. Такой подход к выбору признаков нашел широкое распространение при обнаружении отказов как в непрерывных, так и дискретных безынерционных объектах диагностирования [97]. Исходную информацию о техническом состоянии объекта в этом подходе задают с помощью таблицы функций неисправности. Использование такой модели объекта позволяет свести задачу выбора оптимальной совокупности признаков к задаче определения минимального покрывающего набора.

В рамках применяемой в работе концепции диагностических моделей путь решения первой задачи обнаружения отказов можно представить с помощью следующих этапов:

Этап 1. Выбор типа и определение характеристик ДФМ, соответствующих первому уровню иерархии диагностических моделей, построенных для конкретной СУ с учетом особенностей задачи обнаружения в ней видов отказов из заданного множества D .

Этап 2. Формирование на основании выбранных ДФМ ТЛ-модели с применением метода построения табличных логических моделей, изложенного в п. 2.5. При этом могут использоваться как числовые характеристики косвенных признаков η_i^1 (2.114), η_i^* (2.115) и предикатное уравнение (2.116), так и компоненты функции чувствительности диагностических функциональных моделей в структуре предиката (2.117). В результате получается ТЛ-модель в форме прямоугольной таблицы размером $\mu_1 \times m$.

Этап 3. Определение канонических форм ТЛ-модели с помощью метода построения канонических форм ДЛМ, описанного в п. 2.5. Метод позволяет упростить ТЛ-модель путем использования рекуррентной процедуры, реализующей принцип оптимальности Беллмана и приводящей к получению одной или нескольких канонических форм ТЛ-модели.

Этап 4. Выбор оптимальной канонической формы ТЛ-модели. При получении на 3-м этапе нескольких канонических форм возникает необходимость выбора из них наилучшей. С этой целью на данном этапе формируется технико-экономический критерий, с помощью функционала которого производится численная оценка каждой формы и выбор из полученных численных значений наилучшего, как правило, путем последовательного анализа. Наиболее приемлемым с практической точки зрения для задачи обнаружения отказов СУ является критерий минимума обобщенной стоимости косвенных признаков отказов:

$$I = [C] = \min C_v, v \in N. \quad (4.4)$$

Здесь $C_v = \sum_{C_i^v \in K_v} C_i^v$, где K_v - множество значений стоимостей признаков z_j ,

соответствующих v -й канонической форме; N - множество канонических

форм – TLK-моделей; C_i^V – обобщенная стоимость технико-экономических затрат на получение значения признака z_i , используемого в v -й канонической форме. В результате выполнения этого этапа получается одна, наилучшая с точки зрения используемого критерия каноническая форма – TLK₀-модель.

Этап 5. Описание оптимальной совокупности контролируемых косвенных признаков. Исходя из выбранной оптимальной канонической формы TL-модели производится описание состава используемых косвенных признаков, характера и диапазонов их изменения, точности и времени их измерения, начальных условий для каждого признака. Кроме того, на данном этапе формируются ДФМ в терминах полученной оптимальной совокупности контролируемых косвенных признаков. Все эти данные и модели необходимы для решения последующих задач обнаружения отказов.

Вторая основная задача заключается в формировании диапазона допустимых изменений показателя качества. В общем случае определение допусков на показатели качества представляет собой сложную задачу из-за необходимости учета целевых и экономических факторов [23]. Рассмотрим только задачу определения допусков на показатель качества по известным допускам на параметры динамической системы. Известен ряд методов решения такой задачи. В рассматриваемом сигнально-параметрическом подходе, основанном на концепции диагностических моделей, наиболее приемлемы методы с использованием функций чувствительности [105]. Опишем особенности решения задачи формирования допусков показателя качества.

Для обнаружения отказов могут применяться показатели качества в форме следующих функционалов:

$$I_0 = \Delta y_0(k); I_1 = \sum_{k=k_0}^{k_1} \Delta y_0(k); I_2 = \sum_{k=k_0}^{k_1} |\Delta y_0(k)|; I_3 = \sum_{k=k_0}^{k_1} \Delta y_0^T(k) \Delta y_0(k). \quad (4.5)$$

Если ограничить множество параметров динамической системы только параметрами появления отказов $\gamma_i, i = \overline{1, \mu_1}$, что не повлияет на общность приводимых соотношений, то для рассматриваемой задачи можно записать

$$\Delta y_0(k) = \sum_{i=1}^{\mu_1} \varphi_{0i}(k) \Delta \gamma_i, \quad (4.6)$$

где $\varphi_{0i}(k)$ – функция чувствительности признака $\Delta y_0(k)$ к признаку $\Delta \gamma_i$. Эта функция определяется из соответствующей ДФМ, связывающей используемые признаки.

На основании известных допусков на диагностические параметры $\gamma_i: \gamma_{i\min} \leq \gamma_i \leq \gamma_{i\max}, i = \overline{1, \mu_1}$ и функции чувствительности $\varphi_{0i}(k)$ с помощью соотношения (4.6) вычисляют допустимые изменения признаков $\Delta y_0(k)$. При этом имеется возможность получения нескольких величин допусков. Если обозначить поле допуска i -го диагностического параметра как $\Delta_i = \gamma_{i\max} - \gamma_{i\min}$, то для определения поля допуска косвенного признака $\Delta y_0 = \Delta y_{0\max}(k) - \Delta y_{0\min}(k)$ можно воспользоваться выражением

$$\Delta y_0 = \sum_{i=1}^{\mu_1} \varphi_{0i}(k) \Delta_i. \quad (4.7)$$

Если при назначении поля допуска ориентироваться на наихудшие сочетания допусков, то поле допуска $\Delta^* y_0$ можно определить с помощью формулы

$$\Delta^* y_0 = \sum_{i=1}^{\mu_1} |\varphi_{0i}(k)| \Delta_i. \quad (4.8)$$

Верхнюю оценку $\Delta^* y_0$ поля допуска косвенного признака можно получить, используя максимальные значения функций чувствительности в выражении

$$\Delta^* y_0 = \sum_{i=1}^{\mu_1} |\varphi_{0i}(k)_{\max}| \Delta_i, \quad (4.9)$$

при этом Δ^*y_0 не зависит от времени, т.е. $\Delta^*y_0 = \text{const}$. Очевидно, что $\Delta^*y_0 \geq \Delta y_{0\max} \geq \Delta y_{\max}$.

При расчете допусков, если Δy_i , характеризующие разброс параметров, являются центрированными некоррелированными случайными величинами, можно пользоваться вместо Δ_i значениями дисперсий параметров σ_i^2 . Тогда дисперсия признака $\Delta y_0(k)$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^{\mu_1} \varphi_i^T(k) \varphi_i(k) \sigma_i^2. \quad (4.10)$$

Приведенные соотношения приемлемы для любого класса динамических систем, рассматриваемых в данном исследовании. Оценки полей допусков Δy_0 , Δ^*y_0 , σ_y^2 зависят как от управляющего воздействия $u(k)$, так и от начальных условий $\tilde{y}_0$. Если функция чувствительности определяется для диагностической функциональной модели статического типа, то перечисленные оценки, а также оценка Δ^*y_0 не будут зависеть от $\tilde{y}_0$. Все приведенные оценки (4.7) – (4.10) зависят от управляющего воздействия $u(k)$. Эта зависимость может быть получена в аналитическом виде и использована при формировании допусков показателей качества в реальном масштабе времени при обнаружении отказов.

На основании приведенных оценок по выражениям (4.5) вычисляются поля допусков для показателей качества. Так, для I_0

$$\Delta I_0 = \Delta y_0; \Delta^* I_0 = \Delta^* y_0; \Delta^* I_0 = \Delta^* y_0; \Delta I_{0\sigma} = G_{\sigma y}. \quad (4.11)$$

В силу постоянства поля допуска Δ^*y_0 выражение функционалов принимает вид

$$\Delta I_1 = \Delta^* y_0 (k'_1 - k_0); \Delta I_2 = \Delta^* y_0 (k'_1 - k_0); \Delta I_3 = (\Delta^* y_0)^T (\Delta^* y_0) (k'_1 - k_0). \quad (4.12)$$

Следует отметить, что чем уже поле допуска показателя качества, тем больше возможность более раннего обнаружения отказов с момента начала их развития. Раннее обнаружение отказов позволяет провести более качественный поиск места отказа, его идентификацию и принять оперативные меры по

парированию возникшего отказа, а следовательно, обеспечить требуемый уровень безопасности и живучести СУ.

Перейдем к описанию решения третьей задачи обнаружения – разработке классификационных процедур. В результате решения первой задачи из вектора косвенных признаков системы $\Delta y(k)$ формируется вектор оптимальной совокупности признаков $\Delta y_0(k)$, в общем случае меньшей размерности, чем $\Delta y(k)$. В частном случае $\dim \Delta y_0(k) = \dim \Delta y(k)$. Формирование поля допуска критерия качества $I[\Delta y_0(k)]$, осуществляемое при решении второй задачи, позволяет установить допустимые пределы изменения критерия качества, в которых динамическая система функционирует нормально, т.е. если текущее значение $I[\Delta y_0(k)] \in \Delta I$, то в динамической системе нет отказов. В простейшем случае, при использовании показателя качества в форме функционала вида $I_0[\Delta y_0(k)]$, для классификационной обработки применяется предикатные уравнения (4.2) и (4.3). При использовании показателей качества в других формах для принятия решения о появлении или наличии отказов можно применять в шкале порядка [111] двухзначное предикатное уравнение, имеющее такой вид:

$$f_{\Pi}(I[\cdot], I_{\min}[\cdot]) = (I_{\max} - I) \wedge_{\alpha} (I - I_{\min}) \geq 0 = \begin{cases} 1, & \text{если } I[\cdot] \in \Delta I; \\ 0, & \text{если } I[\cdot] \notin \Delta I, \end{cases} \quad (4.13)$$

где $\wedge_{\alpha}$ – символ R_{α} -конъюнкции.

Для динамических систем блок-схема обнаружения отказов (рис. 4.3) представляет собой комбинацию решений основных задач в виде графических представлений соответствующих решений.

Из вектора разностных сигналов $\Delta y(k)$, являющегося выходом ДФМ для всех признаков $\Delta y_i, i = \overline{1, \mu_1}$, формируется вектор признаков $\Delta y_0(k)$, применяемых для обнаружения отказов. При выборе показателей качества в форме суммы необходим ключ (КЛ), формирующий подачу сигналов в интервале $[k_0, k'_1]$.

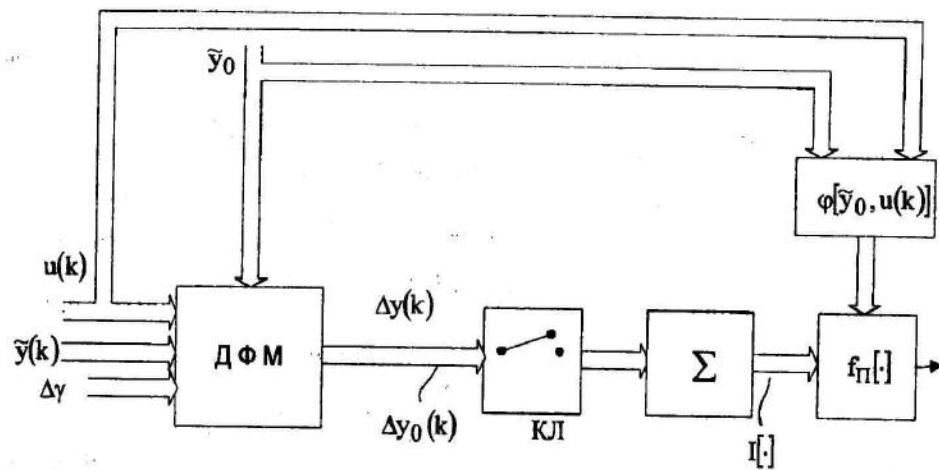


Рис.4.3. Блок-схема обнаружения отказов в динамических системах

В случае необходимости могут быть включены блоки взятия модуля, перемножения. На выходе сумматора будет векторный сигнал, представляющий собой значение показателя качества $I[\Delta y_0(k)]$, который поступает в логический блок классификации, реализующий предикатное уравнение (4.13). Переменные $I_{\min}[\tilde{y}_0, u(k)]$ формируются с помощью блока нелинейной функции $\Phi[\tilde{y}_0, u(k)]$.

Учет специфики класса динамических систем дает возможность представить блок ДФМ в развернутом виде. Так, для класса линейных динамических систем при использовании МЛ-моделей блок-схема показана на рис. 4.4.

В основе ее лежит использование наблюдателя Люенбергера, позволяющего получить вектор $\Delta y(k)$, из которого формируется вектор $\Delta y_0(k)$. В блок-схеме реализован суммарный показатель качества $I_3[\Delta y_0(k)]$ с помощью блока перемножения и сумматора. В результате получается скалярная оценка показателя качества, которая сравнивается с допуском в блоке классификации, имеющем нелинейную характеристику, описываемую предикатным уравнением (4.13).

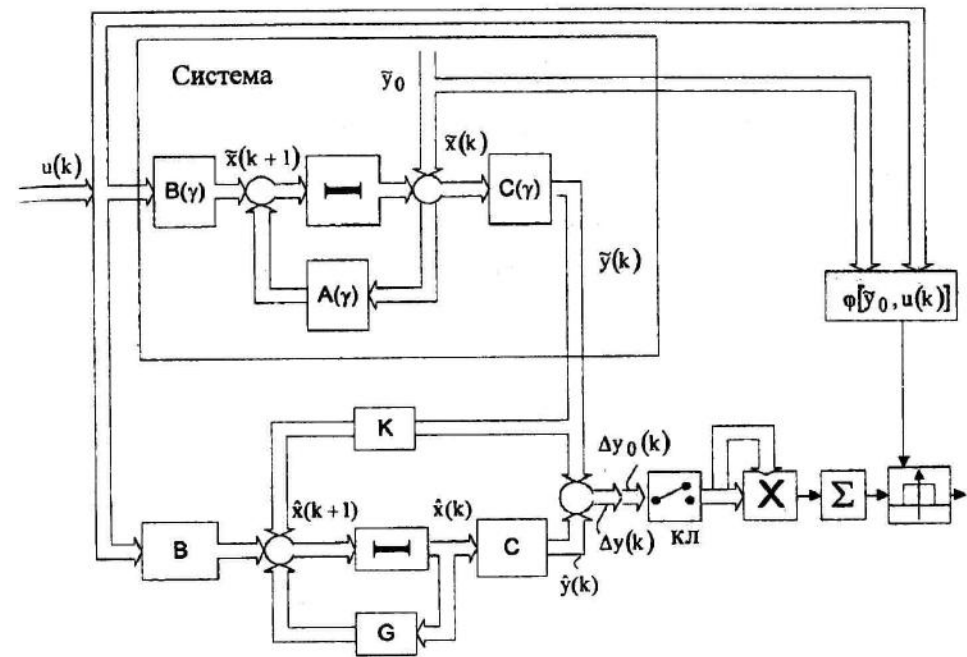


Рис.4.4. Блок-схема обнаружения отказов в линейных системах

Допустимые пределы изменения показателя качества формируются на основании $\tilde{y}_0$ и $u(k)$ с помощью функции $\Phi[\cdot]$.

Следует отметить, что для многих практических задач обнаружения можно не учитывать влияние ненулевых начальных условий $\tilde{y}_0$ на признак $\Delta y_0(k)$, к примеру, для классов систем стабилизации и программного управления, для следящих систем в определенных режимах функционирования и др., а также при использовании статических эталонных моделей. В этом случае формирование допусков показателя качества $I[\cdot]$ производится по более простым алгоритмам. На рис. 4.5 представлена блок-схема алгоритма, в котором допуск формируется без учета ненулевых начальных условий благодаря использованию статических ДФМ. Для некоторых СУ поле допуска показателя качества

$I[\bullet]$ может быть установлено постоянным, не зависящим от текущего значения $u(k)$, в связи с чем в алгоритме обнаружения будет отсутствовать нелинейный блок $\Phi[\bullet]$, и процедура установления факта появления отказа упрощается.

Рассмотренные в этом параграфе задачи и методы решения позволяют формировать алгоритмы обнаружения отказов в динамических системах, что дает возможность перейти к следующей основной задаче – поиску места отказа.

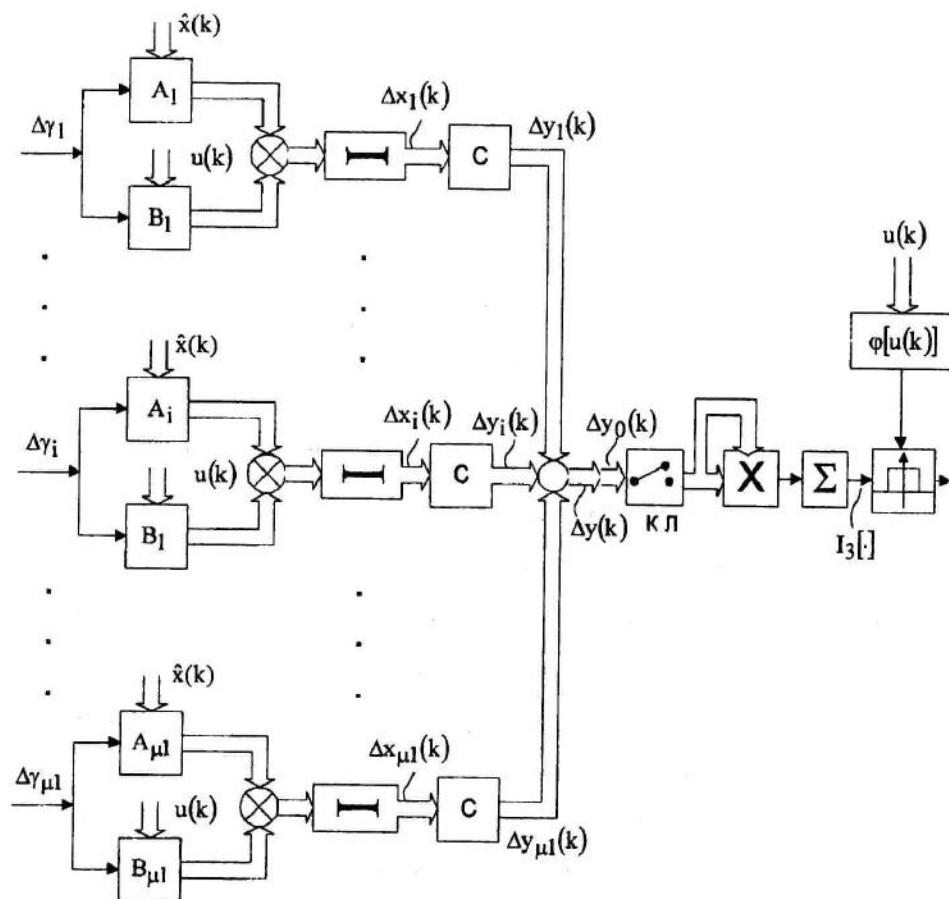


Рис.4.5. Блок-схема обнаружения отказов на базе MS-моделей

4. 2. Поиск места отказа

После обнаружения отказа в СУ следующей характеристикой, неопределенность которой требуется снять, является место его возникновения. Для снятия этой неопределенности необходимо установить, где же произошел отказ, т.е. найти конструктивно законченный блок, узел или элемент, подверженный отказу. В соответствии с принятой концепцией диагностических моделей, согласно которой прямые и косвенные признаки отказов связаны определенными аналитическими соотношениями, задача поиска места отказа может быть сведена к классификационной обработке косвенных признаков системы $\Delta y(k)$ в целях установления факта наличия признака места отказа $\Delta \beta_i, i = \overline{1, \mu_2}$. При таком подходе каждому месту отказа, описываемому признаком $\Delta \beta_i$, соответствует вектор косвенных признаков $\Delta y_i(k)$, и требуется по текущему значению $\Delta y(k)$ найти конкретное место возникновения отказа.

Задача поиска места отказа в содержательной постановке совпадает с известными задачами теории распознавания образов [115]. К настоящему времени сформулированы общие дискриминантный [22] и лингвистический (структурный) [117] подходы к распознаванию образов, позволяющие эффективно решать многие практические задачи, удовлетворяющие определенным ограничениям. Свести задачу поиска места отказа в динамической системе к известным задачам дискриминантного или лингвистического подходов не представляется возможным по целому ряду причин, связанных с динамическим характером изменения признаков $\Delta y(k)$, эталонных образов и с трудностями машинной реализации алгоритмов. Для решения этой задачи наиболее приемлем новый структурно-аналитический подход машинного распознавания объектов с разнотипными признаками [111]. Рассмотрим особенности подхода применительно к решению задачи поиска места отказа [56].

Место i -го отказа характеризуется прямым признаком $\Delta \beta_i$ и описывается вектором косвенных признаков $\Delta y_i^T = [\Delta y_{i1}, \Delta y_{i2}, \dots, \Delta y_{im}]$. Аналитическая

связь этих признаков представлена с помощью соответствующих ДФМ, полученных в результате анализа структурных и сигнальных свойств с помощью соответствующих критериев (см. гл. 3) и обеспечивающих полную диагностируемость относительно признаков места отказа $\Delta\beta_i, i = \overline{1, \mu_2}$. Использование диагностических признаков $\Delta y(k)$ в качестве признаков классификации в общем случае невозможно из-за пересечения множеств их допустимых значений, что не позволяет сформировать непересекающиеся эталонные образы в таком признаковом пространстве и воспользоваться концепцией структурного образа для построения эффективных машинных правил классификации. В целях преодоления указанных трудностей требуется такое преобразование ДФМ, которое обеспечит разделимость косвенных признаков $\Delta y(k)$ в новом пространстве и построение правил поиска места отказа (ППМ) в классе как булевых, так и R-функций.

Принципиальную возможность получения непересекающихся косвенных признаков, а следовательно, и образов мест отказов гарантируют соответствующие критерии полной структурной и сигнальной диагностируемости. Если динамическая система полностью диагностируема относительно множества признаков места отказа $\Delta\beta_i, i = \overline{1, \mu_2}$, то это означает, что возможно однозначное определение места отказа в результате соответствующей обработки признаков $\Delta y(k)$. Для обеспечения различимости образов мест отказов системы требуется произвести ряд преобразований ДФМ в ДПМ в целях получения соответствующих совокупностей косвенных признаков. Как правило, такие совокупности косвенных признаков оказываются избыточными, поэтому для формирования оптимальных совокупностей признаков необходимо сформулировать и решить соответствующую задачу. Полученные оптимальные совокупности признаков позволят построить машинно-реализуемые ППМ минимальной сложности.

Следовательно, разработка конструктивной машинно-ориентированной процедуры поиска места отказа связана с решением таких основных задач:

1) выбор совокупности информативных косвенных признаков для однозначной характеристики мест отказов системы; 2) получение оптимальной структурно-полной совокупности классификационных признаков; 3) формирование эффективных ППМ. Рассмотрим методы решения этих задач.

Сформулируем более подробно первую задачу. Исходными данными являются ДФМ конкретного типа, полностью диагностируемые относительно признаков места отказа $\Delta\beta_i, i = \overline{1, \mu_2}$. Требуется сформировать из вектора $\Delta y(k)$ в терминах булевой переменной признаковое пространство, обеспечивающее различимость мест отказов динамической системы.

Метод решения этой задачи можно представить состоящим из двух этапов. На первом этапе производится преобразование

$$F_1 : \Delta Y^m \rightarrow F_1[\Delta y(k)], \quad (4.14)$$

где F_1 – параметрическое семейство действительных функций, характеризующих множество элементов структуры диагностических признаков в терминах булевой переменной. В качестве такой действительной функции может быть использовано двузначное предикатное уравнение

$$f_1(\Delta y_{ij}) > 0 = \begin{cases} 1, & \text{если } |\Delta y_{ij}| > 0, \\ 0, & \text{если } \Delta y_{ij} = 0. \end{cases} \quad (4.15)$$

Применение к ДФМ такого преобразования (4.14) означает не что иное, как получение диагностической TL-модели объекта исследования. Таким образом, преобразование F_1 позволяет перейти из шкалы отношений, в терминах которой измеряются признаки $\Delta y(k)$, в шкалу наименований, где используется булева переменная для описания признаков. Далее, в целях исследования разделяющих свойств полученных признаков, производится анализ строк TL-модели. Если в таблице нет строк с одинаковой структурой, то это означает, что в полученном признаковом пространстве все места отказов различимы. При наличии одного или нескольких подмножеств строк идентичной структуры необходимо перейти ко второму этапу.

Суть второго этапа решения задачи в общем виде можно представить таким отображением:

$$F_2 : F_1 \rightarrow F_2[\Delta y_i(k), \varphi_i(k)], \quad (4.16)$$

где F_2 - параметрическое семейство действительных функций, описывающих локальные свойства косвенных признаков с использованием функций чувствительности $\varphi_i(k)$ ДФМ к признаку места отказа $\Delta\beta_i$. Для характеристики таких свойств системы можно применить двузначное предикатное уравнение

$$f_2(\Delta y_i(k)) > 0 = \begin{cases} 1, \text{ если } \Delta y_i(k) \in C; \\ 0, \text{ если } \Delta y_i(k) \notin C, \end{cases} \quad (4.17)$$

где C - множество функций, характеризующих признак $\Delta\beta_i$. Применяя это предикатное уравнение к каждому подмножеству строк идентичной структуры TL-модели, получаем новую табличную модель, составленную из строк исходной таблицы, имеющих различную структуру, и строк, полученных в результате использования уравнения (4.17). Сформированную таким образом таблицу назовем табличной логической расширенной моделью - TLR-моделью.

Применение отображения F_2 позволяет расширить признаковое пространство за счет использования более глубоких свойств признаков $\Delta y(k)$. Для "малых" отказов справедливо уравнение $\Delta y_i(k) = \varphi_i(k) \Delta\beta_i$, из которого следует, что

$$\Delta\beta_i = \frac{\Delta y_i(k)}{\varphi_i(k)}. \quad (4.18)$$

Поскольку $\Delta\beta_i = \text{const}$ на интервале диагностирования $[k_0, k_1]$, что вытекает из предположения о квазистационарности прямых диагностических параметров, то из выражения (4.18) следует линейная зависимость двух функций $\Delta y(k)$ и $\varphi_i(k)$. Свойством линейной зависимости между текущими значениями диагностического признака $\Delta y(k)$ и функцией чувствительности $\varphi_i(k)$ можно воспользоваться для нахождения i -го места отказа. Так, если

отношение $\frac{\Delta y(k)}{\varphi_i(k)} \approx \text{const}$, то в i -м месте системы произошел отказ. При

$\frac{\Delta y(k)}{\varphi_i(k)} = \text{var}$ в i -м месте системы отказ отсутствует. Использование отношения

$\frac{\Delta y(k)}{\varphi_i(k)}$ в качестве аргумента предикатного уравнения (4.17) позволяет

представить его в такой форме:

$$f_{2j}(\Delta y_j, \varphi_{ij}) = (\delta - |\Delta y_j(k+1)\varphi_{ij}(k) - \Delta y_j(k)\varphi_{ij}(k+1)| \geq 0) = \begin{cases} 1, \text{ если } |\cdot| \leq \delta; \\ 0, \text{ если } |\cdot| > \delta, \end{cases} \quad (4.19)$$

где $\Delta y_j(\cdot)$ - j -я компонента вектора текущих косвенных признаков системы $\Delta y(k)$; $\varphi_{ij}(\cdot)$ - j -я компонента вектора функции чувствительности для i -го признака. Применив предикатное уравнение (4.19) к подмножеству строк идентичной структуры, получим новые косвенные булевы признаки, позволяющие различать ранее эквивалентные места отказов.

Для определения количества дополнительных косвенных признаков воспользуемся следующим обстоятельством. Если обозначить через β_η η -е подмножество совпадающих k_η строк TL-модели, а через γ - число таких подмножеств, то для различения эквивалентных мест отказов, соответствующих строкам подмножества, требуется ввести $k_\eta - 1$ новых признаков. Тогда дополнительное количество признаков определяется выражением

$$v = \sum_{\eta=1}^{\gamma} k_\eta - \gamma. \quad (4.20)$$

Размерность нового булевого признакового пространства Z^s будет равна $s = m + v$. Выбор того или иного дополнительного признака, порождаемого предикатным уравнением (4.19), зависит от многих факторов, в частности, от объема исходной информации, времени получения признака, простоты машинной реализации и ряда других. Учет таких факторов позволяет выбрать

рациональную совокупность дополнительных признаков с точки зрения их практического получения и построения TLR-модели. Полученное в результате описанных преобразований пространство представляет собой структурно-полное признаковое пространство, в котором места отказов будут различимы.

Вторая задача связана с получением оптимальной структурно-полной совокупности классификационных признаков. Формулируется задача следующим образом. На основании TLR-модели объекта диагностирования требуется получить оптимальную по стоимостному Критерию совокупность булевых признаков, обеспечивающих попарную различимость мест отказов.

Рассмотрим двухэтапный метод решения этой задачи. На первом этапе исходят из предположения о равноценности косвенных признаков и определяют все минимальные совокупности признаков. С этой целью на основании TLR-модели с помощью метода построения булевых матричных моделей (см. п. 2.5) получают ВМ-модель СУ. Эта модель преобразовывается методом построения канонических форм ДЛМ (см. п. 2.5), и в результате получается совокупность M булевых матричных канонических моделей ВМК-моделей, исходя из которых формируется соответствующая совокупность TLK-моделей. На этом завершается первый этап решения задачи. На втором этапе учитываются обобщенные стоимости C_π косвенных признаков, полученных в TLK-моделях, в целях нахождения оптимальной модели, а следовательно, и оптимальной совокупности признаков. В качестве критерия оптимальности используется минимум обобщенной стоимости косвенных признаков

$$I[C_\pi] = \min_{\pi, \pi \in M} C_\pi. \quad (4.21)$$

Здесь обобщенная стоимость C_π для i -й TLK-модели определяется как

$$C_\pi = \sum_{C_j^\pi \in Q_\pi} C_j^\pi, \quad (4.22)$$

где Q_π — множество значений стоимостей признаков z_j , применяемых в π -й TLK; C_j^π — обобщенная стоимость технико-экономических затрат на вычисление признака z_j , используемого в π -й канонической форме. В результате оптимизации получается оптимальная каноническая форма TLK_0 , исходя из которой описывается совокупность признаков z_j , образующих оптимальное структурно-полное признаковое пространство, в котором образы мест отказов попарно различимы.

Третья задача заключается в формировании эффективных ППМ. Постановка задачи состоит в следующем. Даны TLK_0 -модель объекта исследования, предикатные уравнения для используемых косвенных признаков, диапазоны изменения аргументов предикатных уравнений и все характеристики и параметры, участвующие в формировании признаков. Требуется сформировать возможные ППМ и выбрать из них наилучшие с точки зрения технико-экономических затрат на реализацию.

Метод решения сформулированной задачи зависит от выбранного принципа поиска. Определение места отказов может осуществляться с использованием принципов параллельного или последовательного поиска. Применение параллельного поиска порождает безусловные ППМ, принцип последовательного поиска позволяет получить условные алгоритмы поиска, т.е. условные ППМ.

Рассмотрим метод решения задачи, связанный с построением безусловных ППМ. Качественная связь прямых $\Delta\beta_i$ и косвенных признаков z_j отражается TLK_0 -моделью, представленной в форме прямоугольной таблицы. Каждая строка этой таблицы, соответствующая признаку места отказа $\Delta\beta_i$, содержит свой набор булевых переменных (двоичный код), отличающийся от других. Поэтому для каждого места отказа можно записать булеву функцию p_i как конъюнкцию признаков, содержащих "1" в данной строке, и их отрицаний, если признак равен "0". Совокупность таких булевых функций будет представ-

лять собой структуру безусловного ППМ. Если в системе произошел отказ, при котором i -я булева функция $p_i \equiv 1$, т.е. истинна, то это означает, что отказ произошел в i -м месте. В результате проведенных исследований установлена возможность записи булевых функций $p_i, i = \overline{1, \mu_2}$, другими словами, правил $\Phi[z_j]$, различными способами, отличающимися количеством используемых признаков и их отрицаний. Это обстоятельство порождает множество вариантов представления безусловных ППМ. Для выбора среди этих вариантов наилучшего целесообразно оценивать технико-экономические затраты каждого варианта в форме обобщенной стоимости C_ψ , вычисляемой по формуле

$$C_\psi = \sum_{C_j^\psi \in R_\psi} C_j^\psi, \quad (4.23)$$

где C_j^ψ - стоимость получения и использования i -го аргумента булевых функций для ψ -го варианта безусловного ППМ; R_ψ - множество стоимостей аргументов (признаков z_j и их отрицаний $\bar{z}_j$), применяемых в ψ -м варианте. В качестве критерия используем минимум обобщенной стоимости

$$I[C_\psi] = \min_{\psi, \psi \in L} C_\psi. \quad (4.24)$$

где L - множество вариантов реализации безусловных ППМ. Поскольку в практических задачах мощность множества L невелика, то для поиска оптимального варианта применяется метод направленного перебора. Направленность достигается следующим образом. Первый вариант безусловного ППМ получается непосредственно из TLK_0 -модели, при этом в описании булевых функций p_i участвуют все признаки и их отрицания, следовательно, стоимость этого варианта будет наибольшей по сравнению с другими возможными вариантами, т.е. $C_1 = C_{1\max}$. Поэтому любое уменьшение количества используемых аргументов в булевых функциях будет приводить к снижению стоимости варианта $C_\psi < C_{1\max}, \psi \in L$. Перебор

вариантов в таком направлении обеспечит получение наилучшего в смысле критерия (4.24) варианта, позволяющего вместе с тем однозначно найти место отказав системе.

Для описания безусловных ППМ могут применяться R -функции [107], приводящие к аналитическому описанию правил в терминах признаков $\Delta y(k)$.

Вначале рассмотрим функции класса. Из всей достаточно полной системы R_0 -функций для описания ППМ использует только R_0 -конъюнкцию, которая для двух переменных описывается уравнением

$$\gamma_1 \wedge \gamma_2 = (\gamma_1 + \gamma_2 |\gamma_1 - \gamma_2|), \quad (4.25)$$

и R -отрицание

$$\bar{\gamma}_j \equiv -\gamma_j, \quad (4.26)$$

где γ_j - непрерывная, в общем случае переменная величина, представляющая собой аргумент двузначного предикатного уравнения, применяющегося для получения признака z_j . ППМ для i -го признака по переменным $\gamma_j, j = \overline{1, \mu_2}$ может быть описано с помощью последовательного применения R_0 -конъюнкций типа (4.25) и R -отрицаний (4.26) или групповой R_0 -конъюнкции по следующей формуле:

$$\bigwedge_{j=1}^{\mu_2} \gamma_j = \sum_{j=1}^{\mu_2} (\gamma_j - |\gamma_j|) + \prod_{j=1}^{\mu_2} (\gamma_j + |\gamma_j|). \quad (4.27)$$

При построении ППМ можно использовать функции из класса R_1 , позволяющие получить более простые правила. При этом из достаточно полной системы R_1 -функций можно применять только R_1 -конъюнкцию двух переменных

$$\gamma_1 \wedge \gamma_2 \equiv 0.5(\gamma_1 + \gamma_2 - |\gamma_1 - \gamma_2|) = \min(\gamma_1, \gamma_2) \quad (4.28)$$

и R -отрицание (4.26).

Особое внимание при использовании R-функций следует обратить на формирование переменных $\gamma_j, j = \overline{1, \mu_2}$. ДЛМ строится исходя из представления косвенного признака системы в форме уравнения $\Delta y_i(k) = \varphi_i(k) \Delta \beta_i$. Поэтому при построении булевого признакового пространства в предикатных уравнениях типа (2.114) применяли характеристики компонент функций чувствительности φ_{ij} , дающие структуру связи $\Delta y_i(k)$ с признаком $\Delta \beta_i$. При реализации ППМ использование характеристик η_{ij} для формирования признакового пространства, а также поиска места приводит к сложным алгоритмам обработки. В целях упрощения алгоритмов обработки вместо φ_{ij} можно применять соответствующие компоненты вектора косвенных признаков Δy_{ij} , так как структуры векторов $\Delta y_i(k)$ и $\varphi_i(k)$ идентичны для i-го признака. Поэтому переменные γ_i можно представить в таких формах:

$$\gamma_j = |\Delta y_j| - \delta; \quad (4.29)$$

$$\gamma_j = \frac{1}{k' - k_0} \sum_{k=k_0}^{k'-1} \Delta y_j^2 - \delta; \quad (4.30)$$

$$\gamma_j = \delta - |\Delta y_j(k+1) \psi_{ij}(k) - \Delta y_j(k) \psi_{ij}(k+1)|. \quad (4.31)$$

При описании ППМ можно пользоваться как TLK₀, так и правилами $\Phi[z_j]$, где вместо признаков z_j применяются переменные γ_j . При $z_j = 0$ используется R-отрицание, которое, к примеру, для (4.29) равно

$$\bar{\gamma}_j = -\gamma_j = \delta - |\Delta y_j|. \quad (4.32)$$

В общем случае правило поиска места отказа описывается уравнением

$$P_i = S_2 \left(\bigwedge_{j=1}^{\mu_2} \gamma_j \right), \quad (4.33)$$

где $S_2(\cdot)$ – двузначный числовой предикат. Для представления ППМ в терминах булевых функций наиболее целесообразно применять правила $\Phi[z_j]$, полученные в результате оптимизации.

Решение третьей задачи возможно при использовании принципа последовательного поиска. Метод, основанный на этом принципе, приводит к получению условных ППМ. Рассмотрим суть метода. TLK₀-модель отражает качественную связь прямых признаков места $\Delta \beta_i$ с косвенными z_j в терминах булевой переменной. Любой косвенный признак z_j делит все множество прямых признаков на два подмножества: в первое входят $\Delta \beta_i$, для которых $z_j \equiv 1$, второе включает $\Delta \beta_i$, порождающие $z_j \equiv 0$. Использование этого обстоятельства позволяет представить TLK₀-модель в форме графовых древовидных схем, дихотомических деревьев. Графовые схемы, дихотомические деревья представляют собой известные средства в теории поиска [3, 102], а также в технической диагностике [78, 97, 103]. Методы построения схем поиска существенно зависят от формы представления исходных данных задачи. Использование таких моделей, как TLK₀, позволило разработать на основе общих теоретических методов поиска специфические, применимые для данной задачи методы машинного построения условных ППМ. Первый метод заключается в построении всех возможных схем поиска, исходя из TLK₀-модели, путем пошагового деления множества признаков $\Delta \beta_i$ с помощью выбора соответствующей последовательности признаков z_j до получения подмножеств, состоящих из одного конкретного прямого признака места отказа. Установлено, что длина пути поиска места отказа определяется количеством используемых признаков, их стоимостью и существенно зависит от выбора начального базового признака. Желательно построить такую древовидную структуру, стоимости путей которой для всех мест отказов примерно одинаковы. Для количественной оценки структуры древовидной схемы введем понятие средней стоимости пути $C_{ср}$, представляющей

собой среднеарифметическую величину всех стоимостей путей поиска мест. Количественная оценка структуры определяется с помощью соотношения

$$C_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{\mu} C_i}{\mu_2}, \quad (4.34)$$

где C_i - стоимость пути к i -му месту отказа, равная стоимости используемых при этом признаков z_j . С помощью этой количественной оценки из всех возможных схем поиска методом прямого перебора выбирается схема, имеющая $C_{cp} = C_{cp \min}$. В этом методе для построения деревьев поиска выбираются все возможные последовательности признаков для исходной TLK₀-модели. При таком выборе учитываются частично только разделяющие свойства признаков при делении каждого множества признаков на два последующих. Такой выбор признаков приводит к необходимости формирования всех возможных последовательностей признаков и в последующем - к применению метода прямого перебора полученных вариантов схем в целях определения наилучшего среди них. Более полный учет разделяющих свойств позволяет сформировать оптимальную древовидную схему другим рациональным путем, используя при этом метод направленного перебора.

Рассмотрим второй метод построения условных ППМ. В основе этого метода лежит применение веса косвенного признака z_j . Вес p_i определяется с помощью формулы

$$p_i = |2p_j - \mu'_2| C_j, \quad (4.35)$$

где p_j - количество значений "1" в j -м столбце TLK₀, соответствующему анализируемому множеству; C_j - стоимость j -го признака; μ'_2 - количество прямых признаков в текущем множестве. Таким образом, характеристика p_j отражает информационно-стоимостные свойства косвенных признаков. Выбор

признаков и построение дихотомического дерева осуществляется поэтапно. На каждом этапе, начиная с первого, производится вычисление веса косвенных признаков, позволяющего разделить текущее множество прямых признаков на два непересекающихся. При этом из всех возможных признаков выбирается тот, величина веса которого наименьшая: $p_j = p_{j \min}$. Если два или более признаков обладают одинаковыми весами, то можно использовать дополнительные технико-экономические характеристики этих признаков для выбора среди них наилучшего или применить любой из них. Выбранный признак делит исходное множество прямых признаков на два меньших, для каждого из которых последовательно производится аналогичный выбор наилучшего косвенного признака. Полученное в результате такого выбора признаков условное ППМ будет оптимальным и сбалансированным с точки зрения суммарной весовой характеристики.

Пример 4.1. Рассмотрим особенности решения задачи поиска места отказа для релейной системы стабилизации (см. пример 2.3). В качестве диагностических параметров мест отказов используем $\beta = \{K_\phi, K_\phi, C, P_1\}$, где параметр C характеризует отказы релейного преобразователя.

1. На основании MLC-моделей, полностью диагностируемых относительно признаков места, формируем в соответствии с преобразованием (4.14) TL-модель (табл. 4.1).

Таблица 4.1

	Признаки z_j	
	z_1	z_2
ΔK_ϕ	1	0
ΔK_ϕ	1	1
ΔC	0	1
ΔP_1	0	1

Анализ строк полученной модели свидетельствует, что третья и четвертая строки имеют одинаковую структуру. Согласно отображению (4.16), требуется ввести признаки, позволяющие распознать места отказов, характеризую-

мых признаками ΔC и ΔP_1 . Количество дополнительных признаков v по формуле (4.20) равно одному. Введем такой признак z_3 , используя предикат (4.19) для признака ΔP_1 . В результате получим TLR-модель (табл. 4.2).

Таблица 4.2

	Признаки z_i		
	z_1	z_2	z_3
ΔK_ϕ	1	0	0
ΔK_ϕ	1	1	0
ΔC	0	1	0
ΔP_1	0	1	1

2. Для получения оптимальной структурно-полной совокупности классификационных признаков строим BM-модель (табл. 4.3).

Таблица 4.3

	Признаки z_i		
	z_1	z_2	z_3
L_{12}	0	1	0
L_{13}	1	1	1
L_{14}	1	1	0
L_{23}	1	0	1
L_{24}	1	0	0
L_{34}	0	0	1

Применяя метод канонических форм, преобразовываем BM-модель и получаем одну единственную каноническую форму – TLK-модель, совпадающую с TRL-моделью.

3. Безусловные ППМ строим на основе TLK₀-модели (см. табл. 4.2) с учетом следующих стоимостей признаков: $z_1 + C_1 = 2$; $z_2 + C_2 = 1.5$, $z_3 + C_3 = 3$. В результате получим, применяя оптимизационную процедуру с использованием соотношений (4.23) и (4.24) совокупность оптимальных прав:

$$\Phi[z_j] = \begin{cases} P_1 = \overline{z_2}; \\ P_2 = \overline{z_1} \wedge \overline{z_2}; \\ P_3 = \overline{z_1} \wedge \overline{z_3}; \\ P_4 = z_3 \end{cases} \quad (4.36)$$

со значением обобщенной стоимости $C_{10 \min} = 1.3$. Для сравнения: $C_{1 \max} = 26.0$.

Представим полученную $\Phi[z_j]$ в терминах R-функций. Сформируем вначале переменные γ_y :

$$\begin{aligned} z_1 \div \gamma_1 &= |\Delta U_\phi(s^*)| - \delta; & \overline{z_1} \div -\gamma_1 &= \delta - |\Delta U_\phi(s^*)|; \\ z_2 \div \gamma_2 &= |\Delta U_\phi(s^*)| - \delta; & \overline{z_2} \div -\gamma_2 &= \delta - |\Delta U_\phi(s^*)|; \\ z_3 \div \gamma_3 &= \delta - |\Delta U_\phi(s_1^*)V_{P_1}(s_2^*) - \Delta U_\phi(s_2^*)V_{P_1}(s_1^*)|; \\ \overline{z_3} \div -\gamma_3 &= |\Delta U_\phi(s_1^*)V_{P_1}(s_2^*) - \Delta U_\phi(s_2^*)V_{P_1}(s_1^*)| - \delta, \end{aligned} \quad (4.37)$$

где $\Delta U_\phi(\cdot)$, $\Delta U_\phi(\cdot)$ – значения выходного сигнала, полученные при фиксированных действительных значениях переменной s ; $V_{P_1}(\cdot)$, $V_{P_2}(\cdot)$ – значения функций чувствительности MLC-модели для параметра P_1 при фиксированных s . Описанные значения переменных определяются с помощью алгоритма, получаемого в результате аппроксимации интегрального преобразования Лапласа. Так, применяя метод прямоугольников [25, 46], запишем такое выражение для вычисления $\Delta U_\phi(s^*)$ по дискретным выборкам сигнала:

$$\Delta U_\phi(s^*) = T_0 \sum_{k=k_0}^{k_1} \Delta U_\phi(k) e^{-s^* k T_0}. \quad (4.38)$$

Используем для описания ППМ R₁-конъюнкцию (4.28), в результате чего

$$\Phi[\gamma_j] = \begin{cases} P_1 = S_2[-\gamma_2]; \\ P_2 = S_2[\min(\gamma_1, \gamma_2)]; \\ P_3 = S_2[\min(-\gamma_1, -\gamma_3)]; \\ P_4 = S_2[\gamma_3]. \end{cases} \quad (4.39)$$

Построим ППМ, применяя принцип последовательного поиска. Исходя из TLK_0 -модели (см. табл.4.2) получим пять вариантов условных ППМ. Приняв во внимание стоимости признаков z_i , с помощью соотношения (4.34) проанализируем полученные варианты. Наилучший вариант с точки зрения наименьшей стоимости будет представлять собой сбалансированную схему поиска (рис. 4.6) со стоимостью $C_{cp \min} = 4,25$.

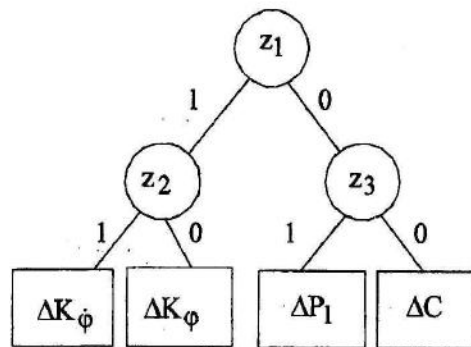


Рис.4.6. Схема оптимального условного ППМ

На рис. 4.7 представлен для сравнения наихудший вариант ППМ. Его средняя стоимость $C_{cp \max} = 5,25$.

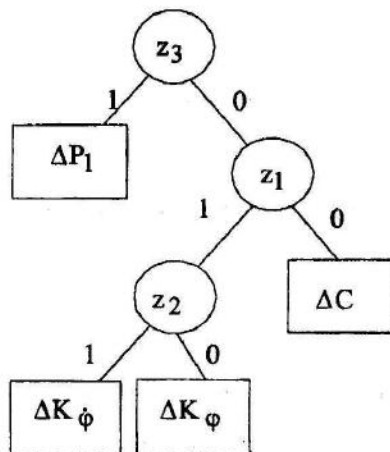


Рис.4.7. Схема условного ППМ

Условное ППМ построим с помощью второго метода. Для TLK_0 -модели в соответствии с формулой получим такие значения весов признаков: $p_1 = 0$;

$p_2 = 3$ и $p_3 = 6$. Наименьший вес – у признака z_1 , поэтому с него и начинается схема поиска. Признак z_1 делит исходное множество прямых признаков на два: первое включает в себя признаки ΔK_ϕ и ΔK_ϕ . Это множество может разделить только признак z_2 , так как $z_3 = 0$. Второе множество содержит признаки ΔC_1 и ΔP_1 . Подсчитаем веса признаков z_j для этого множества: $p_2 = 3$, $p_3 = 0$. Наименьшее значение – у признака z_3 . В результате применения полученных признаков получим оптимальный вариант ППМ, представленный на рис. 4.6. Выразим бинарные признаки z_j через доступные измерению характеристики релейной системы. Тогда

$$\begin{aligned} z_1 &= S_2[|\Delta U_\phi(s^*)| - \delta] = S_2(\gamma_1); \\ z_2 &= S_2[|\Delta U_\phi(s^*)| - \delta] = S_2(\gamma_2); \\ z_3 &= S_2[\delta - |\Delta U_\phi(s_1^*)V_{P_1}(s_2^*) - \Delta U_\phi(s_2^*)V_{P_1}(s_1^*)|] = S_2(\gamma_3). \end{aligned} \quad (4.40)$$

На рис.4.8 представлена схема оптимального условного ППМ в терминах предикатных уравнений (4.40). Итак, поиск места отказа в релейной схеме стабилизации может быть произведен с помощью безусловных ППМ, описанных функцией $\Phi[\gamma_j]$ (4.39) и условных ППМ (рис. 4.8) с помощью предикатов (4.40).

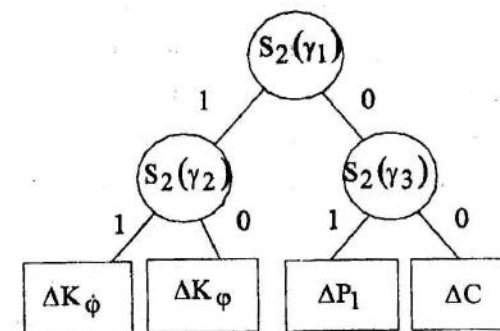


Рис. 4.8. Схема оптимального условного предикатного ППМ

Рассмотренные в этом параграфе методы решения задачи поиска места отказа позволяют сформировать оптимальные безусловные и условные алгоритмы нахождения конструктивно законченной отказавшей части СУ, используя определенные характеристики диагностических моделей, соответствующих решаемой задаче.

4.3. Установление класса отказа

В каждом месте отказа, другими словами, в каждом конструктивно законченном блоке СУ возможные виды отказов на этапе моделирования представлены соответствующими классами. Поэтому следующей характеристикой отказа после установления места является его класс. Принадлежность отказа к тому или иному классу представляет собой неопределенное событие. Для снятия этой неопределенности требуется разработать процедуры, позволяющие по доступным измерениям косвенным признакам СУ устанавливать класс отказа. ДФМ третьего уровня иерархии моделей, соответствующих основной задаче установления класса отказа, связывают прямые признаки класса отказа $\Delta\alpha_i, i = \overline{1, \mu_3}$ с косвенными признаками $\Delta y_i(k)$. При решении рассматриваемой основной задачи установление факта принадлежности отказа к соответствующему классу только с помощью косвенных признаков и функций от них не всегда возможно. Так, для случаев кратных отказов, представляющих сложные виды отказов (к примеру, в операционном усилителе — одновременное уменьшение коэффициента передачи и дрейф), принципиально невозможно различить, используя только косвенный признак — отклонение выходного напряжения, такие классы отказов: 1) уменьшение коэффициента передачи 2) дрейф нуля и 3) совместное их появление. В тех случаях, когда виды отказов связаны с изменением эффективности функционирования элемента СУ (например, изменение коэффициента передачи на 10%, 20%, свыше 50% и т.д.), нецелесообразно применять в качестве классификационного признака отклонение выходного сигнала $\Delta y(k)$. Для такого и аналогичных других случаев рациональным оказывается использование в качестве классификационных признаков значений $\Delta\alpha_i$.

Поскольку $\Delta\alpha_i, i = \overline{1, \mu_3}$ не доступны прямому измерению, то могут использоваться их оценочные значения $\hat{\Delta\alpha}_i$, получаемые с помощью соответствующих процедур параметрической идентификации и оценки. В связи с этим обстоятельством основная задача установления класса отказа сводится к трем следующим взаимосвязанным задачам: 1) получение оценочных значений прямых признаков отказов $\Delta\alpha_i, i = \overline{1, \mu'_3}; \mu'_3 \ll \mu_3$ на основании доступных измерению сигналов системы; 2) формирование признакового пространства классов отказов; 3) построение правил установления классов отказов в целях установления принадлежности отказа, возникшего в конструктивно законченной части системы, соответствующему классу. Рассмотрим более подробно выделенные задачи и возможные методы их решения.

Сформулируем более конкретно постановку первой задачи. Задана совокупность полностью диагностируемых относительно признаков классов ДФМ для конструктивно законченной части системы, связывающих доступные измерению косвенные признаки $\Delta y_i(k)$ с признаками классов $\Delta\alpha_i, i = \overline{1, \mu'_3}$. Необходимо построить наиболее простые из возможных алгоритмы получения с заданной точностью оценочных значений $\hat{\Delta\alpha}_i$, используя сигналы и характеристики диагностических моделей.

Итак, располагая конкретным видом диагностической модели для i -го признака, требуется построить процедуру вычисления значения $\Delta\alpha_i$. Выбор подхода к вычислению $\Delta\alpha_i$ зависит как от принадлежности диагностической модели к той или иной группе, так и от ее структуры. При использовании ДФМ для "малых" отказов наиболее приемлем подход, основанный на связи признаков с помощью функций чувствительности диагностических моделей. Как правило, при таком подходе для каждого типа диагностической модели существует несколько методов вычисления признака класса отказов. Очевидно, что необходимо из всех возможных методов выбрать наименее трудоемкий в отношении вычислительных затрат, достаточно просто реализуемый и обеспечивающий приемлемую точность вычисления.

Если адекватной физическому процессу является диагностическая модель для "больших" отказов, то для построения алгоритмов определения оценок $\Delta\hat{\alpha}_i$ требуется двухэтапный подход. На первом этапе формируются алгоритмы определения коэффициентов диагностической модели, а на втором, исходя из известной функциональной связи коэффициентов модели с признаками классов $\Delta\alpha_i$, строятся алгоритмы вычисления оценок $\Delta\hat{\alpha}_i$. При этом можно использовать известные методы параметрической идентификации. Метод вычисления на втором этапе определяется только структурой функциональной связи коэффициентов модели с признаками классов. Выбор метода на первом этапе осуществляется на основании исходных данных: типа диагностической функциональной модели, начальных условий, требований минимальной сложности реализации алгоритма и точности оценок.

Рассмотрим наиболее приемлемые для первой задачи методы решения, позволяющие построить машинно-реализуемые алгоритмы получения оценочных значений признаков классов $\Delta\alpha_i, i = \overline{1, \mu'_2}$.

4.3.1. Методы построения алгоритмов оценки признаков классов для "малых" отказов

Связь между признаками, заданная с помощью соответствующих типов полностью диагностируемых ДФМ для "малых" отказов, в общем виде для основной задачи – установления класса – может быть представлена таким уравнением:

$$\Delta y(k+1) = \sum_{i=1}^{\mu'_3} \varphi_i(k) \Delta\alpha_i + \xi(k), \quad (4.41)$$

где $\xi(k)$ – вектор помех измерения и ошибок моделирования; $\varphi_i(k)$ – векторная функция чувствительности используемой диагностической модели для i -го признака отказа. На основании этого уравнения можно вычислить значения признаков классов, применяя методы решения систем алгебраических уравнений. Так, если $\dim \Delta y(k+1) = m$, причем $m = \mu'_3$, то уравнение представим в форме

$$\Delta \tilde{y}(k+1) = Q(k) \Delta\alpha, \quad (4.42)$$

где $Q(k)$ – матрица, составленная из векторов чувствительности $\varphi_i(k)$; $\Delta\alpha^T = [\Delta\alpha_1, \dots, \Delta\alpha_{\mu'_3}]$; $\Delta \tilde{y}(k+1)$ – результат измерений. Выражение (4.42) разрешимо относительно вектора $\Delta\alpha$, если $\det Q(k) \neq 0$. При этом

$$\Delta\hat{\alpha} = Q^{-1}(k) \Delta y(k+1). \quad (4.43)$$

В случае недостаточного числа измерений компонент косвенного признака, т.е. когда $m < \mu'_3$, используют результаты измерений в другие моменты времени, например, в следующий $k+1$. Тогда

$$\Delta \tilde{y}(k+2) = Q(k+1) \Delta\alpha. \quad (4.44)$$

Из двух векторно-матричных уравнений (4.42) и (4.44) формируют матрицу $\tilde{Q}(k)$ размером $\mu'_3 \times \mu'_3$ и такую, что $\det \tilde{Q}(k) \neq 0$. В связи с этим

$$\Delta\hat{\alpha} = \tilde{Q}^{-1}(k) \Delta y, \quad (4.45)$$

где Δy – вектор, составленный из компонент векторов $\Delta \tilde{y}(k+1)$ и $\Delta \tilde{y}(k+2)$.

Если $m > \mu'_3$, то из матрицы $Q(k)$ (4.42) формируют новую квадратную невырожденную матрицу $\tilde{Q}(k)$, такую, что

$$\Delta\hat{\alpha} = \tilde{Q}^{-1}(k) \Delta \tilde{y}'(k+1), \quad (4.46)$$

где $\Delta \tilde{y}'(k+1)$ – вектор измерений с μ'_3 компонентами, полученными из вектора $\Delta \tilde{y}'(k+1)$.

В приведенных алгоритмах точность вычисления оценки существенно зависит от вектора $\xi(k)$. Используя избыточность данных измерений можно поповысить точность оценки с помощью метода наименьших квадратов [25, 84]. Получим такой алгоритм оценки. Представим уравнение (4.41) для случая, когда $m > \mu'_3$, в таком виде:

$$\Delta \tilde{y}(k+1) - S'(k) \Delta\alpha = e(k), \quad (4.47)$$

где $\Delta\tilde{y}(k+1)$ – вектор измерений, $S'(k)$ – матрица векторных функций чувствительности; $\Delta\alpha$ – вектор признаков классов; $e(k)$ – вектор невязки уравнения. Для квадратичного критерия

$$V[e(k)] = e^T(k)e(k) \quad (4.48)$$

минимум невязки обеспечивается при условии

$$\frac{\partial V[e(k)]}{\partial \Delta\alpha} = 0.$$

Определим это условие для компонент уравнения (4.47):

$$\begin{aligned} \frac{\partial V[e(k)]}{\partial \Delta\alpha} &= \frac{\partial e^T(k)}{\partial \Delta\alpha} e(k) + e^T(k) \frac{\partial e(k)}{\partial \Delta\alpha} = -S'^T(k)[\Delta\tilde{y}(k+1) - S'(k)\Delta\alpha] + \\ &+ [\Delta\tilde{y}(k+1) - S'^T(k)\Delta\alpha][S'(k)] = 2S'^T(k)S'(k)\Delta\alpha - 2S'^T(k)\Delta\tilde{y}(k+1) = 0. \end{aligned} \quad (4.49)$$

Проведя соответствующие преобразования данного соотношения, сформируем следующий алгоритм оценки:

$$\Delta\hat{\alpha} = [S'^T(k)S'(k)]^{-1}S'^T(k)\Delta\tilde{y}(k+1). \quad (4.50)$$

Оценка, полученная с помощью этого алгоритма, будет оптимальной относительно критерия (4.48).

Все рассмотренные алгоритмы оценки позволяют рассчитать численное значение $\Delta\hat{\alpha}$ в режиме пакетной обработки данных. В ряде практических задач предпочтительной оказывается идентификация в реальном масштабе времени. Наиболее распространены рекуррентные алгоритмы. Использование рекуррентного метода наименьших квадратов [25] позволило получить алгоритм оценки в такой форме:

$$\Delta\hat{\alpha}(k+1) = \Delta\hat{\alpha}(k) + \gamma(k)[\Delta\tilde{y}(k+1) - S'^T(k)\Delta\hat{\alpha}(k)], \quad (4.51)$$

где $\Delta\hat{\alpha}(k)$ – текущее значение вектора признаков классов; $S(k)$ – вектор-строка матрицы $S'(k)$; $\gamma(k)$ – вектор коррекции, определяемый соотношением

$$\gamma(k) = \frac{1}{S'^T(k)P(k)S(k) + 1} P(k)S(k), \quad P(k+1) = [I - \gamma(k)S'^T(k)]P(k). \quad (4.52)$$

Исходные данные для алгоритма: $\Delta\hat{\alpha}(0) = 0$; $P(0) = \lambda I$; λ – коэффициент, влияющий на скорость сходимости оценки.

Пример 4.2. Рассмотрим для УМ сервопривода (см. пример 2.1) класс отказов, характеризующихся одновременным изменением параметров $\tilde{k}_1$ и $\tilde{k}_2$ и опишем его такой ВД-моделью:

$$\Delta U_y(k) = k_3[u_3(k)\Delta k_1 - u_{II}(k)\Delta k_2] + \xi(k).$$

Для получения оценок признаков класса Δk_1 и Δk_2 сформируем матрицу $\tilde{Q}(k)$ размером 2×2 , такую, чтобы $\det \tilde{Q} \neq 0$.

$$\tilde{Q} = k_3 \begin{bmatrix} \tilde{u}_3(k) & -\tilde{u}_{II}(k) \\ \tilde{u}_3(k+1) & -\tilde{u}_{II}(k+1) \end{bmatrix}.$$

Тогда, согласно уравнению (4.45)

$$\begin{bmatrix} \Delta\hat{k}_1 \\ \Delta\hat{k}_2 \end{bmatrix} = \frac{k_3}{\det \tilde{Q}} \begin{bmatrix} \tilde{u}_{II}(k+1) & -\tilde{u}_{II}(k) \\ -\tilde{u}_3(k+1) & \tilde{u}_3(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\tilde{u}_y(k) \\ \Delta\tilde{u}_y(k+1) \end{bmatrix}.$$

Сформировав избыточное количество данных в форме матрицы

$$S = k_3 \begin{bmatrix} \tilde{u}_3(k) & -\tilde{u}_{II}(k) \\ \tilde{u}_3(k+1) & -\tilde{u}_{II}(k+1) \\ \tilde{u}_3(k+2) & -\tilde{u}_{II}(k+2) \end{bmatrix},$$

получим с помощью (4.50) пакетный алгоритм оценки по методу наименьших квадратов, а используя выражения (4.51) и (4.52) – рекуррентный алгоритм.

В тех случаях, когда возникает необходимость оценки только одного признака класса ($\mu'_3 = 1$), описанные алгоритмы могут быть значительно упрощены. Так, уравнение (4.41) принимает такой вид:

$$\Delta y(k+1) = \varphi_i(k)\Delta\alpha_i + \xi(k), \quad (4.53)$$

На основании этого соотношения можно вычислить величину признака класса

$$\Delta\alpha_i^j = \frac{\Delta\tilde{y}_{ij}}{\varphi_{ij}}, \quad (4.54)$$

используя только по одной компоненте векторов $\Delta\tilde{y}(k+1)$ и $\varphi_i(k)$. Выбор i -й компоненты производят в результате анализа структуры r компонент вектора $\varphi_i(k)$. Выбирают компоненту $\varphi_{ij}(k)$, вычисляемую наиболее простым способом по сравнению с другими. При высоких требованиях к точности вычисления признаков можно использовать в общем случае избыточность данных и m его значений получить по формуле (4.54), а затем искомое значение — как среднее арифметическое

$$\Delta\hat{\alpha}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta\alpha_i^j. \quad (4.55)$$

По методу наименьших квадратов алгоритм оценки приобретает следующий вид:

$$\Delta\hat{\alpha}_i = \frac{\varphi_i^T(k) \Delta\tilde{y}(k+1)}{\varphi_i^T(k) \varphi_i(k)}. \quad (4.56)$$

Рекуррентный метод наименьших квадратов порождает алгоритм аналогичной структуры (4.51), в которой вместо вектора S_k используется векторная функция чувствительности $\varphi_i(k)$, и такой алгоритм позволяет получить оценку $\Delta\hat{\alpha}_i(k)$ на интервале диагностирования.

4.3.2. Методы построения алгоритмов оценки признаков классов для "больших" отказов

Рассмотрим возможные методы построения алгоритмов на примере BL-модели вида

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= G\Delta x(k) + \Delta A(\Delta\alpha_i) \tilde{x}(k) + \Delta B(\Delta\alpha_i) u(k) + \zeta(k); \\ \Delta y(k) &= C\Delta x(k) + v(k); \quad \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0. \end{aligned} \quad (4.57)$$

В общем случае зависимости $\Delta A(\Delta\alpha_i)$ и $\Delta B(\Delta\alpha_i)$ — нелинейные. На практике встречаются диагностические модели, в одной матрице которых, предположим, $\Delta A(\cdot)$, наблюдается линейная зависимость коэффициентов от признака класса $\Delta\alpha_i$, а в другой $\Delta B(\cdot)$ — нелинейная зависимость или наоборот. Подойдем к ДФМ (4.57) с точки зрения идентификационного подхода [127]. Размерности матриц с неизвестными коэффициентами соответственно такие: $\dim \Delta A = (n \times n)$, $\dim \Delta B = (n \times r)$. В общем случае количество неизвестных коэффициентов равно суммарной размерности матриц, т.е. $\eta = (n \times n) + (n \times r) = n(n+r)$. Это, конечно, верхняя оценка, так как во многих практических случаях матрицы $\Delta A(\cdot)$ и $\Delta B(\cdot)$ имеют некоторые нулевые компоненты. Если исходить из общего случая, то для определения неизвестных матриц необходимо вычислить η коэффициентов. Параметрическая идентификация матриц $\Delta A(\cdot)$ и $\Delta B(\cdot)$ позволит перейти по известным аналитическим зависимостям к определению численных значений признаков классов $\Delta\alpha_i$.

Необходимо отметить, что каждый коэффициент неизвестных матриц связан с $\Delta\alpha_i$ соответствующей зависимостью. Следовательно, для получения величины $\Delta\alpha_i$ достаточно численного значения одного любого коэффициента. Идентификация только лишь одного коэффициента для рассматриваемой модели (4.57) возможна, и, более того, существует путь сокращения сложности объема вычислений в n раз. В целях упрощения дальнейших выкладок примем, что $C = 1$, и тогда из уравнений (4.57) выражение для j -й компоненты имеет вид

$$\Delta y_j(k+1) = \sigma \Delta y_j(k) + [\Delta a_{j1}, \Delta a_{j2}, \dots, \Delta a_{jn}] \begin{bmatrix} \tilde{y}_1(k) \\ \tilde{y}_2(k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_n(k) \end{bmatrix} + [\Delta b_{j1}, \Delta b_{j2}, \dots, \Delta b_{jn}] \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_n(k) \end{bmatrix} + \zeta_j(k). \quad (4.58)$$

В представленном выражении количество неизвестных коэффициентов — $n+r$, что значительно меньше количества неизвестных коэффициентов $\Delta A(\cdot)$ и

$\Delta B(\cdot)$. Уравнение (4.58) с математической точки зрения представляет собой алгебраическое уравнение с $n + r$ неизвестными. Для определения любого неизвестного требуется еще $n + r - 1$ уравнений. Они формируются из соотношения (4.58) путем использования сигналов $\tilde{y}(k), u(k)$ и $\Delta y_i(k)$ в различные моменты квантования, к примеру, $k = \overline{1, n + r}$. В результате получаем систему алгебраических уравнений, которую в векторно-матричной форме можно представить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1\lambda} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2\lambda} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{\lambda 1} & q_{\lambda 2} & \cdots & q_{\lambda\lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_\lambda \end{bmatrix}, \quad (4.59)$$

или в сокращенной форме:

$$W = QI, \quad (4.60)$$

где

$$W_1 = \Delta \tilde{y}_j(2) - \sigma \Delta \tilde{y}_j(1), \dots; W_\lambda = \Delta \tilde{y}_j(1 + n + r) - \sigma \Delta \tilde{y}_j(n + r); \\ l_1 = \Delta a_{j1}, \dots; l_\lambda = \Delta a_{jr}; \quad q_{11} = \tilde{y}_1(1), \dots, q_{1\lambda} = u_r(1); \quad \lambda = n + r.$$

Если определитель матрицы Q $\det Q \neq 0$, то существует обратная матрица Q^{-1} , и, следовательно, вектор неизвестных коэффициентов I находится в результате решения уравнения

$$Q^{-1}W = I. \quad (4.61)$$

Чтобы получить аналитическое выражение для нахождения одного неизвестного параметра l_v , необходимо раскрыть структуру матрицы Q^{-1} :

$$Q^{-1} = \frac{\tilde{Q}^{-1}}{\det Q},$$

где $\tilde{Q}$ - присоединенная матрица. Тогда

$$l_v = \frac{1}{\det Q} (w_1 \tilde{q}_{v1} + w_2 \tilde{q}_{v2} + \dots + w_\lambda \tilde{q}_{v\lambda}). \quad (4.62)$$

Коэффициенты присоединенной матрицы $\tilde{q}_{vy}$ можно выразить через коэффициенты матрицы Q , используя соотношения

$$\mu = (-1)^{v+y}, \exists \mu = 1 \rightarrow \tilde{q}_{vy} = q_{\lambda+1-v, \lambda+1-y}; \quad \exists \mu = -1 \rightarrow \tilde{q}_{vy} = -q_{vy}.$$

Для общего случая, когда матрица $C \neq 1$, неизвестные коэффициенты уравнений (4.57) могут быть определены аналогичным образом по диагностической модели вход-выход, которая получается в результате Z -преобразования [25]. Рассмотренный метод позволяет найти численное значение любого коэффициента диагностической модели (4.58). В общем случае любой коэффициент модели связан соответствующей аналитической зависимостью с признаком класса $\Delta \alpha_i$. Приравняв полученное в результате вычисления значение аналитическому выражению коэффициента через известные физические параметры системы и $\Delta \alpha_i$, получаем алгебраическое нелинейное уравнение с одним неизвестным. Разрешив его относительно признака $\Delta \alpha_i$, находим несколько его значений, из которых выбираем одно, соответствующее физической сути решаемой задачи. Для повышения точности оценки $\Delta \hat{\alpha}_i$ вычисляют несколько значений коэффициентов соответствующей диагностической модели. На основании этих значений и их аналитических выражений определяют несколько приемлемых значений признака $\Delta \alpha_i$. Окончательная оценка получается как среднее арифметическое вычисленных значений признаков. Повысить точность оценки признака класса можно путем использования пакетного или рекуррентного метода наименьших квадратов для решения системы избыточных уравнений типа (4.59), когда $\lambda > n + r$.

В ряде случаев возможен и другой, более простой подход к определению $\Delta \hat{\alpha}_i$. Суть его заключается в следующем. На основании уравнения (4.58) с использованием измеренных значений $\tilde{y}(k), \Delta \tilde{y}(k)$ и $u(k)$ формируется алгебраическое уравнение с одним неизвестным $\Delta \alpha_i$, в наиболее распространенных случаях – второй, третьей или четвертой степени. Разрешив его относительно $\Delta \alpha_i$ в радикалах или численно, получают несколько

значений, из которых выбирают одно, соответствующее сути задачи. Точность оценки $\Delta\hat{\alpha}_i$ можно повысить путем многократного решения алгебраического уравнения для измерений в различные моменты времени и последующего среднеарифметического усреднения выбранных вычисленных значений $\Delta\alpha_i$.

Рассмотреть группу диагностических моделей нелинейных систем для "больших" отказов в таком же плане, как это было сделано для линейных систем, не представляется возможным в силу многообразия нелинейных структур и отсутствия общего конструктивного их аналитического описания. Следует отметить, что и необходимости такого рассмотрения нет, так как основные принципиальные моменты, как показывает опыт, совпадают с описанными для линейных систем.

Пример 4.3. Построим алгоритмы оценки признака Δb исходя из BDS-модели (2.107). Используя действительное значение $s = s^*$ и первое уравнение диагностической модели, получим выражение

$$\Delta b' = -\frac{1}{s^*} \ln \left(1 + \frac{\Delta u_{\varphi}(s^*)}{\frac{k_{\varphi}}{(s^*)^3} \frac{1}{I_x} P_1 e^{-bs^*}} \right).$$

Из второго уравнения модели следует, что

$$\Delta b'' = -\frac{1}{s^*} \ln \left(1 + \frac{\Delta u_{\varphi}(s^*)}{\frac{k_{\varphi}}{(s^*)^2} \frac{1}{I_x} P_1 e^{-bs^*}} \right).$$

На основании величин признаков можно путем усреднения

$$\Delta \hat{b} = \frac{\Delta b' - \Delta b''}{2}$$

получить более точное значение признака Δb .

Описанные в этом параграфе подходы и методы применимы для одновременного вычисления оценки не только одного признака класса, но и нескольких, характеризующих разные классы для данного места отказа.

4.3.3. Формирование признакового пространства классов отказов

Вторая задача – формирование признакового пространства – сводится к формальной задаче построения оптимальной канонической табличной логической модели – TLK₀-модели, обеспечивающей однозначную связь признаков, на основании использования косвенных признаков ДФМ и оценочных значений $\Delta\hat{\alpha}_i, i = \overline{1, \mu'_3}$ прямых признаков, а также их стоимостей.

Решение этой задачи можно представить в форме последовательности таких этапов:

Этап 1. Формирование TL-модели для конструктивно законченной части СУ на основании ДФМ-моделей и значений $\Delta\hat{\alpha}_i$.

Этап 2. Анализ полученной TL-модели и введение при необходимости новых дополнительных признаков с целью формирования TLR-модели.

Этап 3. Построение ВМ-модели и всех ее канонических форм – ВМК-моделей.

Этап 4. Формирование исходя из ВМК-моделей совокупности табличных канонических форм - TLK-моделей.

Этап 5. Определение TLK₀-модели, удовлетворяющей минимуму стоимостного критерия.

Рассмотрим особенности решения задачи в соответствии с приведенными этапами. На первом этапе строится TL-модель, связывающая признаки классов $\Delta\alpha_i$ с косвенными признаками z_j . При этом для формирования признаков z_j применяются свойства как сигналов, так и параметров ДФМ, описывающих исследуемый фрагмент СУ. Косвенные признаки могут формироваться исходя из общих рекомендаций и структур предикатных уравнений (2.116) и (2.117), а

также с учетом специфических свойств сигналов и параметров диагностических моделей классов отказов. Так, на основании опыта разработки диагностических моделей установлено, что наиболее целесообразно с точки зрения удобства и эффективности реализации использовать свойство постоянства признаков ДФМ, а также постоянство выходных сигналов фрагментов СУ. Признаки дрейфа нуля, смещения характеристик функциональных элементов можно сформировать следующим образом:

$$z_j = S_2 [\delta - |\Delta y(k+1) - \Delta y(k)|], \forall k \in [k_0, k_1]. \quad (4.63)$$

Различного рода изменения эффективности элементов (изменение коэффициентов передачи, инерционных свойств и т.д.) можно характеризовать такими признаками:

$$z_j = S_2 [\delta - |\Delta \hat{\alpha}_i(k)|], \quad (4.64)$$

$$z_j = S_2 [\delta - |\Delta \alpha'_i(k+1) - \Delta \alpha'_i(k)|], \forall k \in [k_0, k_1]. \quad (4.65)$$

где $\Delta \hat{\alpha}_i(\cdot)$ - значение оценки в соответствующие моменты времени. Для случая применения двух оценок $\Delta \hat{\alpha}_i(\cdot)$ и $\Delta \alpha'_i(\cdot)$ признак определяется уравнением

$$z_j = S_2 [\delta_i - |\Delta \hat{\alpha}_i(k+1) - \Delta \hat{\alpha}_i(k)|] \wedge S_2 [\delta_j - |\Delta \hat{\alpha}_j(k+1) - \Delta \hat{\alpha}_j(k)|], \forall k \in [k_0, k_1] \quad (4.66)$$

Аналогичным образом формируется признак z_j для ситуаций использования более двух оценок признаков классов. Если класс отказов характеризует различные обрывы, то более приемлемым является применение такого предикатного уравнения:

$$z_j = S_2 [\delta - |\tilde{y}(k+1) - \tilde{y}(k)|], \forall k \in [k_0, k_1]. \quad (4.67)$$

Рассмотренные способы введения признаков z_j не исчерпывают всего многообразия возможных форм предикатных уравнений, отражающих свойства

классов отказов. Итак, в результате использования сигналов и параметров строится TL-модель для каждой конструктивно законченной части СУ.

На втором этапе производится анализ TL-модели в целях выявления строк с одинаковой структурой. С помощью формулы (4.20) определяется количество дополнительных признаков и, путем введения их с помощью соответствующих предикатов типа (4.63) – (4.67), формируется табличная расширенная модель – TLR-модель. Эта модель описывает структурно-полное признаковое пространство для установления классов отказов. Построение BM-модели осуществляется на третьем этапе в соответствии с изложенным методом (см. п.2.5). Далее BM-модель преобразовывается в совокупность канонических форм с помощью рекуррентной процедуры (см. п.2.5), и получаются ВМК-модели.

Четвертый этап связан с формированием из каждой ВМК-модели соответствующей TLK-модели путем вычеркивания из последней избыточных столбцов.

На пятом этапе учитываются стоимости признаков C_j и в соответствии с критерием (4.21) производится выбор наилучшей модели, обладающей минимальной обобщенной стоимостью C_π (4.22). В результате оптимизации получается TLK₀-модель, связывающая признаки классов $\Delta \hat{\alpha}_i, i = \overline{1, \mu_3}$ признаками z_j , представляющими собой оптимальную совокупность и характеризующими признаковое пространство классов отказов.

Пример 4.4. Сформируем признаковое пространство для классов УМ сервопривода. Классы характеризуются такими признаками:

$$\Delta \alpha = \{\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3 u_{y0}, \Delta k_1 \Delta k_2, \Delta \alpha_6\},$$

где $\Delta k_1 \Delta k_2$ – класс одновременных отказов; $\Delta \alpha_6$ – класс неопределенных отказов. УМ описываем следующими BD-моделями, полностью диагностируемыми относительно признаков классов:

$$\tilde{k}_1 : \Delta u_y(k) = k_3 u_3(k) \Delta k_1; \quad \tilde{k}_2 : \Delta u_y(k) = -k_3 u_{\Pi}(K) \Delta K_2;$$

$$\tilde{k}_3 : \Delta u_y(k) = [k_1 u_3(k) - k_2 u_{II}(k)] \Delta k_3;$$

$$\tilde{u}_{y0} : \Delta u_y(k) = u_{y0};$$

$$\tilde{k}_1 \tilde{k}_2 : \Delta u_y(k) = k_3 [u_3(k) \Delta k_1 - u_{II}(k) \Delta k_2].$$

В результате проведенного исследования в соответствии с описанным методом была получена TLK₀-модель. Для формирования признака первого и пятого классов используем оценку $\Delta \hat{k}_1(k)$ (см. пример 4.2). Тогда

$$z_1 = S_2 [\delta_1 - |\Delta \hat{k}_1(k)|] \wedge S_2 [\delta_1 - |\Delta \hat{k}_1(k+1) - \Delta \hat{k}_1(k)|], \forall k \in [k_0, k_1].$$

Аналогичным образом формируется признак z_2 для второго и пятого классов. Признак третьего класса описывается таким уравнением:

$$z_3 = S_2 [\delta_3 - |\Delta u_y(k) [u_3(k+1) - u_{II}(k+1)] - \Delta u_y(k+1) [u_3(k) - u_{II}(k)]|], \forall k \in [k_0, k_1].$$

Характерным для четвертого класса является постоянство $\Delta u_y(k)$ на интервале диагностирования, и поэтому

$$z_4 = S_2 [\delta_4 - |\Delta u_y(k+1) - \Delta u_y(k)|], \forall k \in [k_0, k_1].$$

Полученная TLK₀-модель (табл. 4.4) позволяет однозначно определить любой из шести заданных классов с помощью оптимальной совокупности описанных признаков.

Таблица 4.4

$\Delta \alpha_i$	Признаки z_i			
	z_1	z_2	z_3	z_4
ΔK_1	1	0	0	0
ΔK_2	0	1	0	0
ΔK_3	0	0	1	0
U_{y0}	0	0	0	1
$\Delta K_1 \Delta K_2$	1	1	0	0
$\Delta \alpha_6$	0	0	0	0

4.3.4. Построение правил установления классов отказов

Третья задача заключается в построении правил установления классов отказов, с помощью которых определяются классы отказов. Совокупность этих правил назовем сокращенно ПОК. Формальная постановка задачи состоит в следующем. Даны TLK₀-модель фрагмента СУ, предикатные уравнения, описывающие косвенные признаки, и все условия для их решения. Требуется построить все возможные ПОК и выбрать из них оптимальную относительно технико-экономических затрат.

Как следует из постановки, сформулированная задача принадлежит к задачам поиска [2, 77]. Ключевым вопросом при построении ПОК является выбор принципа поиска. Классы отказов могут определяться с использованием как параллельного, так и последовательного принципов поиска. Применение параллельного принципа поиска позволяет построить безусловные ПОК, а последовательного – порождает условные ПОК. В связи с этим не существует общего метода решения задачи построения ПОК. Характерным для возможных методов решения является наличие двух взаимосвязанных этапов. Первый заключается в формировании возможных вариантов ПОК, реализующих используемый принцип поиска. На втором этапе производится обоснованный выбор наилучшего варианта в соответствии с принятым технико-экономическим критерием. Такой двухэтапный подход к решению задачи позволяет построить эффективные ПОК с точки зрения целевого назначения, а также требуемых для их реализации машинных ресурсов.

Для построения безусловных ПОК применимы методы формирования безусловных правил поиска места отказа, изложенные в п. 4.2. При этом ПОК могут описываться в терминах двузначных признаков z_j и дискретных γ_j с помощью двузначных предикатов и R-функций аналогично безусловным ГПМ.

Методы построения условных ПОК основаны на дихотомическом последовательном делении признаков классов $\Delta \alpha_i$ с использованием TLK₀-модели диагностируемой конструктивно законченной части СУ с помощью

косвенных признаков z_j . Описанные в п. 4.2 методы построения условных ППМ в наибольшей степени применимы для построения условных ПОК. В результате использования этих методов получаются условные ПОК в форме сбалансированных дихотомических ветвей определения классов для каждого места отказа. Признаки в узлах ветвей могут описываться с помощью двузначных предикатных уравнений, R-функций с использованием дискретных характеристик γ_j , вычисляемых на основании сигналов $\Delta y(k)$, $\bar{y}(k)$ или оценок признаков классов $\Delta \hat{\alpha}_i$.

Таким образом, для построения эффективных ПОК применимы методы построения ППМ, позволяющие найти приемлемое, наилучшее решение третьей задачи, входящей в состав основной задачи по установлению класса отказа.

Пример 4.5. Построим возможные ПОК для TLK₀-модели (см. табл.4.4) УМ сервопривода.

Безусловные ПОК в терминах z_j описываются системой таких булевых функций:

$$\Phi[z_j] = \begin{cases} P_1 = z_1 \wedge \bar{z}_2; \\ P_2 = \bar{z}_1 \wedge z_2; \\ P_3 = z_3; \\ P_4 = z_4; \\ P_5 = z_1 \wedge z_2; \\ P_6 = \bar{z}_1 \wedge \bar{z}_2 \wedge \bar{z}_3 \wedge \bar{z}_4. \end{cases}$$

Для описания $\Phi[\cdot]$ в терминах R-функций сформируем переменные γ_j :

$$z_1 \div \gamma_1' = \delta_1 - |\Delta \hat{k}_1(k)|, \quad \gamma_1'' = \delta_1' - |\Delta \hat{k}_1(k+1) - \Delta \hat{k}_1(k)|;$$

$$z_2 \div \gamma_2' = \delta_2 - |\Delta \hat{k}_2(k)|, \quad \gamma_2'' = \delta_2' - |\Delta \hat{k}_2(k+1) - \Delta \hat{k}_2(k)|;$$

$$z_3 \div \gamma_3 = \delta_3 - |\Delta u_y(k)[u_3(k+1) - u_{\Pi} - u_{\Pi}(k+1)] - \Delta u_y(k+1)[u_3(k) - u_{\Pi}(k)]|;$$

$$z_4 \div \gamma_4 = \delta_4 - |\Delta u_y(k+1) - \Delta u_y(k)|;$$

$$\bar{z}_1 \div -\gamma_1', -\gamma_1''; \quad \bar{z}_2 \div -\gamma_1', -\gamma_2''.$$

Используя R₁-конъюнкцию, представим ПОК в таком виде:

$$\Phi[\gamma_j] = \begin{cases} P_1 = S_2[\min(\gamma_1', \gamma_1'', -\gamma_2', -\gamma_2''); \\ P_2 = S_2[\min(-\gamma_1', -\gamma_1'', \gamma_2', \gamma_2''); \\ P_3 = S_2[\gamma_3]; \\ P_4 = S_2[\gamma_4]; \\ P_5 = S_2[\min(\gamma_1', \gamma_1'', \gamma_2', \gamma_2''); \\ P_6 = P_1 \wedge P_2 \wedge P_3 \wedge P_4. \end{cases}$$

При построении условных ПОК используем следующие стоимости признаков: $C_1 = 2; C_2 = 2; C_3 = 1,5; C_4 = 1$. Согласно первому методу сформируем возможное множество всех схем поиска и оценим их с помощью соотношения (4.34). В результате анализа семи схем выберем дихотомическую ветвь, для которой $C_{CP} = 4,75$ (рис. 4.9).

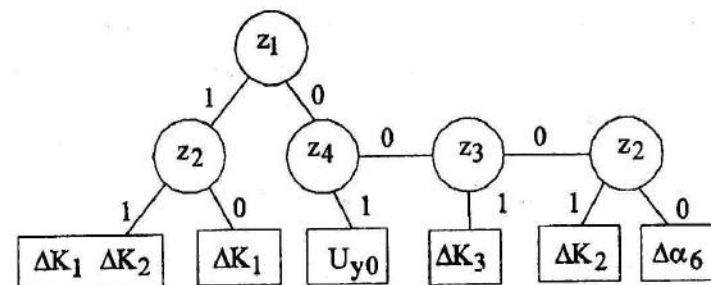


Рис. 4.9. Дихотомическая ветвь условного ПОК

Второй метод направленного перебора позволил с помощью весов (4.35) определить еще две дихотомические ветви, обладающие минимальными стоимостями (рис. 4.10, а, б).

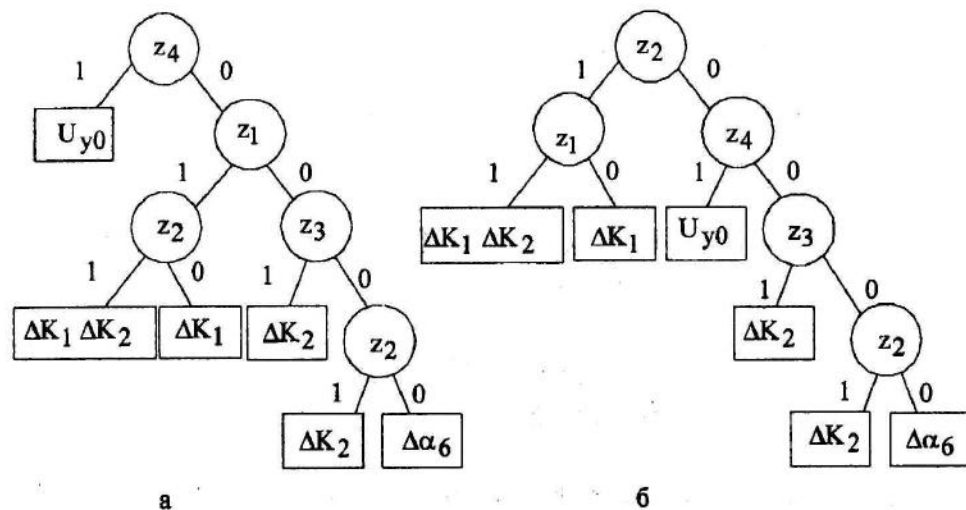


Рис. 4.10. Дихотомические сбалансированные ветви ПОК

Рассмотренный в этом параграфе подход к решению основной задачи – установление класса отказа – дает возможность декомпозировать ее на три взаимосвязанных, для решения которых предложены конструктивные машинно-ориентированные методы, позволяющие строить эффективные безусловные и условные правила установления классов отказов в любой конструктивнозаконченной части СУ.

4.4. Определение вида отказа

Каждый класс отказов включает в себя в общем случае несколько видов отказов $d_i \in D$. Появление того или иного вида отказа представляет собой неопределенное событие. Для определения конкретного вида отказа в каждом классе требуется разработать соответствующую машинную процедуру, позволяющую в результате определенной обработки выходных данных и классификации отказов установить вид d_i текущего отказа в СУ. Итак, четвертая основная задача диагностирования – определение вида отказа – заключается в разработке процедур определения видов отказов на основании использования оценок признаков классов, сигналов $\Delta y(k)$ и $y(k)$, а также соответствующих подмно-

жеств видов отказов и параметрических характеристик. В общей своей постановке основная задача определения видов отказов совпадает с задачами классификации в теории распознавания образов [22, 115, 117]. Вместе с тем имеющиеся методы решения таких задач обладают большой универсальностью, что не позволяет учесть в полной мере априорные данные о признаках видов отказов, а, следовательно, и получить эффективные решения. Использование методологии решения классификационных задач применительно к определению видов отказов дало возможность разработать эффективные методы решения.

В результате проведенных исследований основную задачу определения вида отказа удалось декомпозировать на следующие три взаимосвязанные задачи: 1) создание TL-модели видов отказов; 2) формирование признакового пространства видов отказов; 3) построение правил определения видов отказов. Перейдем к подробному рассмотрению выделенных задач и предложенных методов их решения.

Первая задача заключается в создании TL-модели, связывающей виды отказов d_i с соответствующими признаками видов, формируемых с использованием оценок признаков классов отказов, сигналов $\Delta y(k)$ и $y(k)$ и диапазонов их возможного изменения. Ключевым моментом при решении этой задачи является формирование признаков видов. Для описания признаков применяются предикатные уравнения. Рассмотрим основные свойства предикатных уравнений [107], необходимые для описания признаков видов отказов.

Пусть $p_i = F(\mu_i)$ есть функция непрерывного аргумента $\mu_i (-\infty < \mu_i < \infty)$, определенная в некоторой области H_i числового множества H , причем $\mu_i \in \{\Delta \hat{\alpha}_i(k), \Delta \hat{y}(k), \hat{y}(k)\}$. Если значения, которые может принимать эта функция в области Ω_i , принадлежат множеству $B_v = \{0, 1, \dots, v-1\}$, то функция $p_i = F(\mu_i)$ есть v -значный предикат в области H_i .

Предикату $p_i = F(\mu_i)$ можно поставить в соответствие разбиение числового множества H_i на непересекающиеся подмножества $H_{i1}, H_{i2}, \dots, H_{iv}$,

включив в подмножество H_{il} те значения множества H , в которых выполняется условие $F(\mu_i) = 1$, представляющее собой предикатное уравнение подмножества H_{il} .

В связи с тем, что значения, которые могут принимать v -значные предикаты, принадлежат множеству V_v , их можно использовать как аргументы функций v -значной логики. Пусть, к примеру, $p_i = F(\mu_i) \in V_v, i = \overline{1, q}$ есть v -значные предикаты, а $\Phi(x_1, x_2, \dots, x_q)$ – функция v -значной логики с алфавитом V_v . Тогда функцию $P = \Phi[F_1(\mu_1), F_2(\mu_2), \dots, F_q(\mu_q)]$ можно рассматривать как v -значный предикат, так как $P \in V_v$, а областью определения является множество H .

Из всех возможных предикатов будем применять самые простейшие – двузначные, обладающие таким свойством:

$$S_2(\rho) = \begin{cases} 1 & \text{при } \rho \geq 0; \\ 0 & \text{при } \rho < 0. \end{cases} \quad (4.68)$$

При формировании аргумента ρ двузначного предиката исходим из следующего [44]. В результате изучения и исследования отказов и характера их проявления в объекте диагностирования производится их параметризация, и для каждого вида определяют подмножества $H_{il}, i = \overline{1, v}$. Если выбрать для каждого подмножества H_{il} нижнее значение $\eta_{il}^H = \inf H_{il}$ и верхнее значение $\eta_{il}^B = \sup H_{il}$, то в общем случае аргумент ρ можно сформировать для признака вида μ_i с помощью уравнений

$$\rho'_{il} = \mu_i - \eta_{il}^H, \quad \rho''_{il} = \eta_{il}^B - \mu_i. \quad (4.69)$$

Двузначные предикаты типа (4.68) с использованием таких аргументов характеризуют расположение μ_i по отношению к η_{il}^H и η_{il}^B следующим образом:

$$S_2(\rho'_{il}) = \begin{cases} 1 & \text{при } \mu_i \geq \eta_{il}^H; \\ 0 & \text{при } \mu_i < \eta_{il}^H; \end{cases} \quad S_2(\rho''_{il}) = \begin{cases} 1 & \text{при } \mu_i \leq \eta_{il}^B; \\ 0 & \text{при } \mu_i > \eta_{il}^B. \end{cases} \quad (4.70)$$

Применение таких предикатов позволяет сформировать булевы признаки видов z_j для подмножества элементов d_j , соответствующих рассматриваемому классу отказов. Полученные в результате такого исследования данные позволяют построить TL-модель видов отказов, которая связывает виды отказов данного класса $d_i, i = \overline{1, v}$ с косвенными признаками $z_j, j = \overline{1, \pi}$.

Пример 4.6. Построим TL-модель для видов отказов УМ сервопривода, состоящих в уменьшении чувствительности по входу $u_3(k) - d_2$, в обрыве по входу $u_3(k) - d_6$ и в появлении неопределенного вида отказа d_9 .

Текущее значение признака класса Δk_1 известно в форме оценки $\hat{\Delta k}_1$. Виду отказа d_i соответствует подмножество H_i , включающее в себя значения на интервале $[-\delta, -k_{1H} + \delta]$, где δ – пороговое значение для изменения Δk_1 . Виду отказа d_6 соответствует подмножество $H_2: \Delta k_1 \in [-k_{1H} + \delta, -k_{1H} - \delta]$. Вид отказа d_9 характеризуется подмножеством H_3 всех остальных значений числовой оси.

Введем следующие косвенные признаки с помощью предикатных уравнений вида

$$z_1 = S_1(-\hat{\Delta k}_1 - \delta); \quad z_2 = S_2(-\hat{\Delta k}_1 - k_{1H} + \delta). \quad (4.71)$$

Использование этих предикатных уравнений и подмножества видов отказов $\{d_1, d_6, d_9\}$ позволяет построить TL-модель (табл.4.5).

Таблица 4.5

d_i	Признаки z_i	
	z_1	z_2
d_2	1	0
d_6	1	1
d_9	0	1

Пример 4.7. Сформируем TL-модель для четвертого класса отказов УМ сервопривода, включающего в себя такие виды отказов: d_{11} – отрицательный устранимый дрейф нуля; d_{12} ; – положительный устранимый дрейф нуля, d_{13} – положительный неустранимый дрейф нуля; d_{14} – отрицательный неустранимый дрейф нуля.

Считаем, что известны оценочное значение признака класса $\Delta \hat{u}_y$, а также численные значения границ подмножеств для каждого вида. Тогда признаки введем с помощью предикатных уравнений:

$$\begin{aligned} z_1 &= S_2(\Delta \hat{u}_y - u_{41}^H); & z_2 &= S_2(-u_{41}^B - \Delta \hat{u}_y); \\ z_3 &= S_2(\Delta \hat{u}_y - u_{42}^H); & z_4 &= S_2(-u_{42}^B - \Delta \hat{u}_y); \\ z_5 &= S_2(\Delta \hat{u}_y - u_{42}^B); & z_6 &= S_2(-u_{41}^B - \Delta \hat{u}_y). \end{aligned} \quad (4.72)$$

Связав заданные виды отказов со значениями признаков z_j , получим TL-модель (табл. 4.6).

Таблица 4.6

d_i	Признаки z_j					
	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6
d_{11}	1	1	0	1	0	0
d_{12}	1	0	1	1	0	0
d_{13}	1	0	1	0	1	0
d_{14}	0	1	0	1	0	1

Вторая задача – определение вида отказа – связана с формированием признакового пространства. Исходными данными для задачи являются TL-модель и стоимости косвенных признаков $C_j, j=\overline{1, \pi}$. Требуется сформировать TLK₀-модель, оптимальную с точки зрения суммарной стоимости используемых в ней признаков и обеспечивающую однозначную взаимосвязь видов отказов с признаками. Постановка второй задачи схожа с постановками

задач формирования признакового пространства в п. 4.2 и п. 4.3.3, поэтому для ее решения применимы ранее описанные методы с соответствии со следующей методикой. Решение второй задачи представим в форме последовательности взаимосвязанных этапов:

Этап 1. Анализ TL-модели на предмет разрешимости задачи и введение при необходимости новых дополнительных признаков в целях формирования TLR-модели, обеспечивающей разрешимость основной задачи.

Этап 2. Построение ВМ-модели и определение с помощью метода построения канонических форм (см. п. 2.5) всех ВМК-моделей, обеспечивающих попарную различимость видов отказов по их косвенным признакам.

Этап 3. Формирование на основании ВМК-моделей совокупности табличных канонических форм – TLK-моделей.

Этап 4. Определение TLK₀-модели, являющейся наилучшей среди всех TLK-моделей по стоимостному критерию.

Опишем содержание выделенных этапов решения второй задачи. На первом этапе анализируется исходная TL-модель, связывающая виды отказов $d_i, i=\overline{1, v}$ с их косвенными признаками $z_j, j=\overline{1, \pi}$. Условием разрешимости основной задачи определения вида отказа по TL-модели является наличие различной структуры строк. В том случае, если в TL-модели имеются одна или несколько совокупностей одинаковых строк, основная задача не может быть полностью разрешена, что означает невозможность однозначного определения по косвенным признакам z_j каждого вида отказа из заданного подмножества. Таким образом, анализ TL-модели заключается в выявлении совокупностей одинаковых строк. Наиболее приемлемым методом анализа TL-моделей в рамках данного исследования представляется следующий. Исходная TL-модель преобразуется в ВМ-модель. Для каждой строки ВМ-модели вводится сигнатура, являющаяся суммой единичных символов. По нулевым значениям сигнатуры выбираются затем из ВМ-модели попарные сочетания строк, из которых формируются совокупности строк одинаковой структуры в TL-модели. После анализа

видов отказов, соответствующих строкам одинаковой структуры, а также их косвенных признаков, вводятся новые признаки, обеспечивающие различимость этих видов. В результате использования такой процедуры появляется TLR-модель, позволяющая решить основную задачу.

Второй этап связан с построением из TLR-модели соответствующей BM-модели и формированием из нее всех возможных канонических форм с помощью рекуррентной процедуры на основе функциональных уравнений (2.122) и (2.123).

Формирование TLK-моделей производится на третьем этапе. Между BMK- и TLK-моделями существует взаимнооднозначное соответствие. Это свойство позволяет перейти от конкретной BMK-модели к конкретной TLK-модели путем выбора из исходной TLR-модели столбцов, соответствующих применяемым в полученной канонической форме косвенным признакам z_j .

На последнем этапе решения задачи с использованием стоимостей признаков C_j определяется суммарная стоимость каждой TLK-модели в соответствии с критерием (4.21), осуществляется выбор наилучшей модели, обладающей минимальной суммарной стоимостью C_π (4.22). В результате получается TLK₀-модель, применяемые косвенные признаки которой представляют собой оптимальное признаковое пространство для однозначного определения любого вида отказов из подмножества заданных.

Пример 4.8. Найдем оптимальное признаковое пространство для определения видов отказов, используя TL-модель (см. табл. 4.6) и стоимости признаков: $C_1=1$; $C_2=1,5$; $C_3=1$; $C_4=1,5$; $C_5=C_6=2$. Анализ исходной модели свидетельствует об отсутствии в ее составе строк идентичной структуры. Следовательно, TLR-модель совпадает с исходной.

На основании TL-модели строим BM-модель (см. табл. 4.7) и формируем из нее с помощью рекуррентной процедуры все канонические формы. В результате получаем семь канонических форм, включающих в себя следующие признаки: $BMK_1 \div \{z_1, z_2, z_4\}$, $BMK_2 \div \{z_1, z_3, z_4\}$, $BMK_3 \div \{z_1, z_2, z_5\}$,

$BMK_4 \div \{z_1, z_3, z_5\}$,

$BMK_5 \div \{z_6, z_3, z_4\}$,

$BMK_6 \div \{z_6, z_2, z_5\}$,

$BMK_7 \div \{z_6, z_3, z_5\}$.

Таблица 4.7

l in	Признаки z_i					
	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6
l_{12}	0	1	1	0	0	0
l_{13}	0	1	1	1	1	0
l_{14}	1	0	0	0	0	1
l_{23}	0	0	0	1	1	0
l_{24}	1	1	1	0	0	1
l_{34}	1	1	1	1	1	1

Всех TLK-моделей получается семь. Составы столбцов BMK_i и TLK_i -моделей $i = \overline{1,7}$ совпадают. Наименьшей суммарной стоимостью $C_2=3,5$ обладает TLK_2 -модель (см. табл. 4.6), следовательно, $TLK_0=TLK_2$.

Третья задача определения вида отказа заключается в построении правил определения видов отказов. В качестве исходных данных используются: TLK_0 -модель, предикатные уравнения для признаков z_j , стоимости признаков C_j . Требуется сформировать оптимальные правила определения видов с точки зрения их стоимости. Формальная постановка задачи построения правил определения видов (ПОВ) совпадает с постановками аналогичных задач в п. 4.2 и 4.3.4. Проведенные исследования возможных методов решения задачи построения ПОВ показали, что наиболее эффективны в рамках предлагаемого подхода методы, разработанные для построения ППМ (п. 4.2) и примененные при формировании ПОК (см. п. 4.3.4).

Задача построения ПОВ принадлежит к задачам поиска, и поэтому выбор принципа поиска – параллельного или последовательного – существенным образом влияет на технологию последующей разработки ПОВ. Общим для технологий разработки безусловных и условных ПОВ является наличие двух этапов. На первом этапе формируются возможные варианты ПОВ, реализующие ис-

пользуемый принцип поиска видов, на втором осуществляется обоснованный выбор наилучшего решения, соответствующего применяемому технико-экономическому критерию.

При построении безусловных ПОВ используются те же методы, что и для формирования безусловных ППМ (см. п. 4.2). Безусловные ПОВ могут описываться в терминах двузначных признаков z_j и дискретных переменных ρ'_{ij} и ρ''_{ij} (4.69) с помощью двузначных предикатов (4.70) и R-функций.

Построение условных ПОВ производится с помощью соответствующих методов формирования сбалансированных дихотомических схем поиска, описанных в п. 4.2. В результате для каждого класса отказов получается дихотомическая ветвь, обеспечивающая однозначное определение всех видов отказов. В узлах ветви размещаются признаки, которые могут описываться с помощью предикатных уравнений типа (4.70), R-функций с использованием переменных ρ'_{ij} и ρ''_{ij} .

Итак, построение эффективных как безусловных, так и условных ПОВ производится с помощью тех же методов, что и построение ППМ.

Пример 4.9. Построим безусловные и условные ПОВ для TLK-модели (табл. 4.8), z_j признаки которой описываются уравнениями

$$z_1 = S_2(\Delta \hat{u}_y - u_{41}^H); \quad z_3 = S_2(\Delta \hat{u}_y - u_{42}^H); \quad z_4 = S_2(-u_{42}^B - \Delta \hat{u}_y) \quad (4.73)$$

и имеют такие значения стоимостей: $C_1=1$, $C_3=1$, $C_4=1,5$.

Таблица 4.8

d_{ij}	Признаки z_j		
	z_1	z_3	z_4
d_{11}	1	0	1
d_{12}	1	1	1
d_{13}	1	1	0
d_{14}	0	0	1

Для построения безусловных ПОВ формируем множество возможных вариантов, из которых с помощью соотношений (4.23) и (4.24) получаем оптимальную по стоимости совокупность правил

$$\Phi[z_j] = \begin{cases} d_{11} = z_1 \wedge \overline{z_3}; \\ d_{12} = z_3 \wedge z_2; \\ d_{13} = \overline{z_4}; \\ d_{14} = \overline{z_1} \end{cases} \quad (4.74)$$

со значением общей стоимости $C_{12 \min} = 7$. Представим полученную $\Phi[z_j]$ в терминах R-функций, сформировав с этой целью для признаков z_j соответствующие переменные ρ_{ij} :

$$z_1 \div \rho'_{11} = \Delta \hat{u}_y - u_{41}^H; \quad z_3 \div \rho'_{12} = \Delta \hat{u}_y - u_{42}^H; \quad z_4 \div \rho''_{14} = u_{42}^B - \Delta \hat{u}_y; \quad (4.75)$$

$$\overline{z_1} \div -\rho'_{11} = u_{41}^H - \Delta \hat{u}_y; \quad \overline{z_3} \div -\rho'_{12} = u_{42}^H - \Delta \hat{u}_y; \quad \overline{z_4} \div -\rho''_{14} = \Delta \hat{u}_y - u_{42}^B.$$

Используя R_i-конъюнкцию (4.28), получим описание безусловного ПОВ в таком виде:

$$\Phi[\rho_{ij}] = \begin{cases} d_{11} = S_2[\min(\rho'_{11}, -\rho'_{12})]; \\ d_{11} = S_2[\min(\rho'_{12}, -\rho''_{14})]; \\ d_{11} = S_2[-\rho''_{14}]; \\ d_{11} = S_2[\rho'_{11}]. \end{cases} \quad (4.76)$$

Формирование условного ПОВ произведем с помощью второго метода. На первом шаге определим значения весов признаков в соответствии с формулой (4.35). В результате получим $p_1=2$; $p_3=0$; $p_4=3$. Наименьший вес – у признака z_3 , следовательно, с него и начинается схема поиска. Этот признак делит исходное множество видов на два: первое включает в себя виды отказов d_{12} и d_{13} . Данное множество может разделить только признак z_4 , так как признак $z_1=1$. Во второе множество входят виды отказов d_{11} и d_{14} , которые могут быть разделены только с помощью признака z_1 . Полученная в результате оптимальная условная схема поиска видов отказов представлена на рис. 4.11.

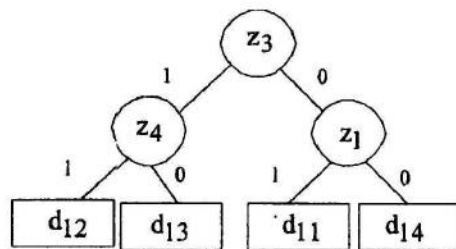


Рис. 4.11. Дихотомическая ветвь условного ПОВ

Выразим признаки z_j полученного условного ПОВ через оценочные значения разностного сигнала УМ и пороговые значения напряжения

$$\begin{aligned} z_1 &= S_2(\Delta \hat{u}_y - u_{41}^H) = S_2(\rho_{11}'); \\ z_3 &= S_2(\Delta \hat{u}_y - u_{42}^H) = S_2(\rho_{12}'); \\ z_4 &= S_2(u_{42}^B - \Delta \hat{u}_y) = S_2(\rho_{14}'). \end{aligned} \quad (4.77)$$

Применение этих предикатных уравнений также дает возможность представить условные ПОВ в форме дихотомической ветви (рис. 4.12).

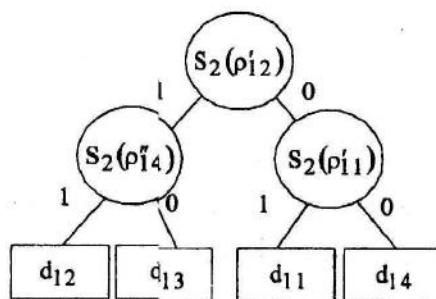


Рис.4.12. Схема условного предикатного ПОВ

В этом параграфе рассмотрены задача определения вида отказа и методы ее решения, позволяющие сформировать оптимальные по стоимости, безусловные и условные, машинно-ориентированные алгоритмы определения в каждом классе видов отказов СУ, заданных множеством D .

4.5. Организация алгоритмов диагностирования СУ

В предыдущих параграфах проанализированы основные задачи диагностирования СУ и методы их решения, составляющие основу сигнально-параметрического подхода. Результатом решения основных задач является совокупность алгоритмов определения соответствующих характеристик отказов на основании доступных измерению сигналов СУ. Такими характеристиками отказов служат: 1) момент появления отказа или факт его наличия; 2) место возникновения отказа; 3) класс появившегося отказа; 4) конкретный вид отказа. Определение этих характеристик отказов не может осуществляться в произвольном порядке из-за наличия между ними соответствующей связи, порожденной иерархией основных задач диагностирования. В связи с этим обстоятельством алгоритмы определения характеристик отказов должны быть организованы в комплексную алгоритмическую систему, обеспечивающую последовательное снятие неопределенности в причинах аварийного состояния СУ. Рассмотрим особенности такой организации алгоритмов диагностирования.

Решение первой основной задачи – обнаружения отказов – получается в форме взаимосвязанных алгоритмов формирования косвенных признаков системы $\Delta y(k)$, вычисления текущих значений критерия $I[\cdot]$ и его допусков, алгоритмов принятия решения. Совокупность этих алгоритмов представляет, по сути, алгоритмический модуль обнаружения отказов, который обозначим символом O . Входными данными модуля O являются массивы из сигналов $u(k)$, $\tilde{y}(k)$, сформированные на заданном интервале диагностирования $[k_0, k_1]$, а также паспортные данные, соответствующие номинальной СУ.

Выходом модуля O служит заключение о наличии или отсутствии отказов в СУ.

После получения заключения о наличии отказов следующий шаг в диагностировании – поиск места отказов. Решение второй основной задачи представляет собой совокупность ППМ условных или безусловных, в зависимости от выбранного принципа поиска. Алгоритмический модуль,

включающий в себя ППМ, обозначим символом М. Входными данными этого модуля являются: заключение о наличии отказов, массивы значений косвенных признаков, паспортные характеристики системы, значения допусков, интервал диагностирования, коэффициенты доверия для вычисления признаков z_j . Выходом модуля М служит заключение о наличии отказа в i -месте, $i = \overline{1, \mu_2}$.

Следующей характеристикой отказа, которую требуется определить, является его класс. В результате решения задачи установления класса для каждого места отказа получается совокупность ПОК. Обозначим такую совокупность символом K_i . Входные данные модуля K_i включают в себя заключение о наличии отказа в i -м месте СУ, массивы значений косвенных признаков отказов, все атрибуты для вычисления признаков z_j . Выходом модуля K_i служит заключение о принадлежности отказа к g -му классу.

Последней характеристикой отказа, выявляемой в процессе диагностирования, является вид отказа. Решение четвертой основной задачи диагностирования – определения вида отказа – позволяет получить для каждого класса отказа соответствующие ПОВ, представляющие собой алгоритмический модуль $V_i^g, g = \overline{1, \mu_3}$. Входными данными модуля V_i^g служат заключение об отказе в g -м классе, оценочные значения параметров, граничные значения областей их изменения, соответствующие видам отказов, допуска. Выход модуля V_i^g связан с указанием наименования вида отказа, возникшего в СУ.

Представим в обобщенном виде схему организации процесса диагностирования в терминах описанных алгоритмических модулей (рис. 4.13).

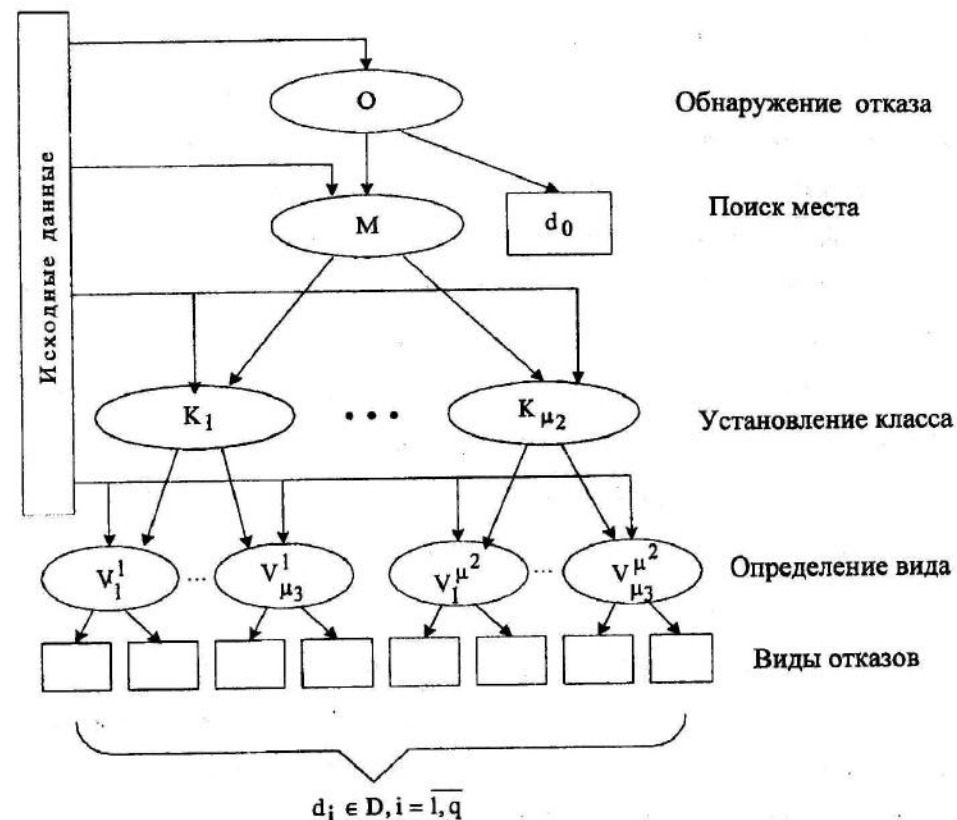


Рис. 4.13. Древовидная схема организации алгоритмических модулей

Процесс диагностирования начинается с формирования исходных данных о СУ, касающихся паспортных сведений, массивов из сигналов $u(k)$ и $\tilde{y}(k)$, выбранных для заданного интервала диагностирования. На основании этих сведений алгоритмический модуль О позволяет сформировать заключение о наличии или отсутствии отказов в СУ. Выход модуля d_0 соответствует заключению о нормальном режиме функционирования системы. При наличии отказов в СУ подключается алгоритмический модуль М, который на основании старых исходных данных и дополненных новых, состоящих из массивов сигналов дополнительных контрольных точек, значений допусков, коэффициентов доверия, производит вычисление косвенных признаков z_j и, в

соответствии с реализованными ППМ, выдает заключение о конкретном месте отказа. Общее количество мест μ_2 включает в себя и ситуацию, когда конструктивно законченная часть СУ не может быть однозначно определена по причине малой выборки сигналов, или высокого уровня шумов и помех измерений, или по ряду других причин, требующих дальнейшего выяснения.

Полученное заключение о конкретном месте отказа служит основанием для использования соответствующего модуля K_i , производящего путем обработки необходимых исходных данных о сигналах и характеристиках СУ установление класса отказа из μ_3 возможных для данного места.

В соответствии с установленным классом отказа активизируется модуль V_i^F , обеспечивающий на основании определенных исходных данных об оценках параметров, характеристик видов и допусков формирование заключения о конкретном $d_i \in D$ виде отказа, возникшем в СУ.

Очевидно, что в представленной обобщенной схеме организации алгоритмов диагностирования воплощен иерархический принцип взаимосвязи алгоритмических модулей, определяющих соответствующие характеристики, с помощью которых последовательно производится выявление причины отказа СУ. Структура алгоритмического описания каждого модуля зависит от выбранного принципа поиска соответствующих характеристик.

На рис. 4.14 приведены примеры описания модуля V_i^F для конкретных безусловных (4.74) и условных (см. рис. 4.11) ПОВ.

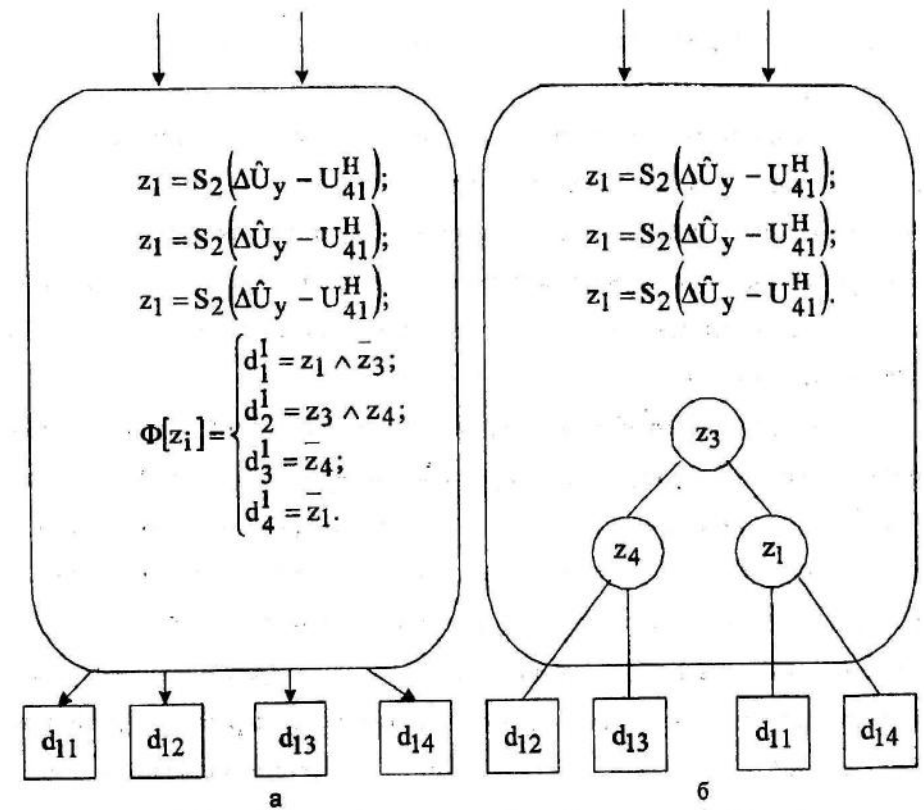


Рис. 4.14. Примеры описаний модуля V_i^F : а – безусловные ПОВ, б – условные ПОВ

Представленная схема организации алгоритмов диагностирования СУ, как показывает опыт, позволяет создать достаточно конструктивную технологию разработки программного обеспечения, базирующегося на принципах построения экспертных и знаниеориентированных систем [98, 128, 130]. Описанные алгоритмические модули представляют собой, по сути, n -значные предикаты на массивах исходных данных об объекте диагностирования. Эти предикаты отражают познанные закономерности влияния отказов на доступные измерения характеристики СУ, т.е. представляют собой конкретные знания о свойствах аварийной СУ, получаемые в результате выполнения соответствующих процедур над исходными данными. Поэтому алгоритмические модули яв-

ляются основой для построения соответствующей базы знаний с помощью продукционных систем. Необходимая компонента процесса обработки знаний – машина логического вывода, или управляющая структура – строится на основе древовидной схемы организации модулей. Интерфейс с пользователем создается с применением текстового описания всех характеристик отказов, а также путем организации диалогового режима в терминах данной области знаний в целях представления пользователю логики и знаний, использованных для получения заключения о причинах отказа в СУ.

Технология разработки программного обеспечения процесса диагностирования значительно упрощается при небольшой мощности множества отказов (порядка 10... 30 видов) и применении условного принципа поиска характеристик отказов. В результате решения основных задач диагностирования с использованием этого принципа получается совокупность соответствующих дихотомических ветвей. Объединение ветвей согласно иерархии основных задач и взаимосвязи их решений порождает дихотомическое дерево процесса диагностирования СУ. В узлах дерева размещаются соответствующие признаки, представляющие собой двузначные предикатные уравнения на множестве массивов дискретных значений доступных измерению сигналов системы. Такие уравнения решаются на соответствующих массивах дискретных значений с использованием определенного коэффициента доверия, уменьшающего влияние дестабилизирующих факторов (помех измерения, шумов, ошибок моделирования) на качество решения. В результате решения предикатного уравнения получается значение 0 или 1, определяющие направление дальнейшего прохождения по дереву. Закачивается дерево листьями, которые соответствуют возможным состояниям и заданным видам отказов СУ. Построенное таким образом дихотомическое дерево представляет собой алгоритмическую модель процесса диагностирования системы управления. Компьютерная реализация такой модели не вызывает больших трудностей и позволяет получить программную систему автоматизированного диагностирования СУ с заданной глубиной и высокой достоверностью.

Пример 4.10. Рассмотрим особенности построения дихотомического дерева на основе пневматического сервопривода, представленного в номинальном режиме функционирования структурной схемой (рис. 4.15).

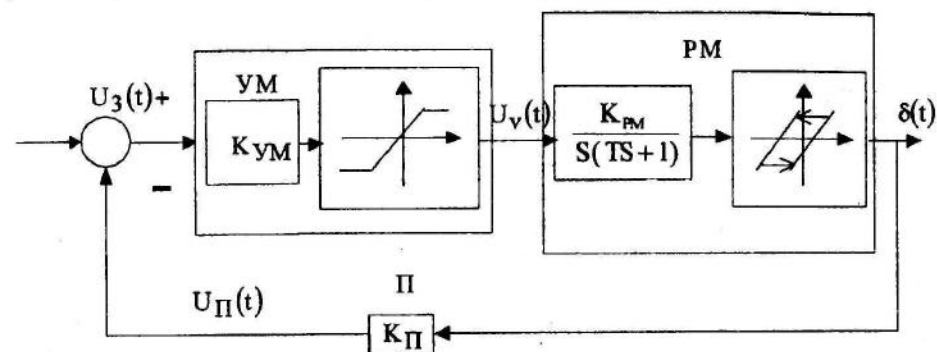


Рис.4.15. Структурная схема пневматического сервопривода

Сервопривод состоит из усилителя мощности (УМ), рулевой машинки (РМ), потенциометра (П). В структурной схеме учтены нелинейные свойства УМ – в форме характеристики ограничения – и РМ – в форме характеристики люфта. Доступными измерению сигналами являются $U_3(t)$, $U_y(t)$ и $U_{\Pi}(t)$. Для УМ, выполненного на операционном усилителе, подмножество видов отказов состоит из семи элементов: $D_i = \{d_1, d_2, \dots, d_7\}$, где d_1 – неустранимый дрейф нуля; d_2 и d_3 – устранимый положительный и отрицательный дрейфы нуля; d_4 – пробой усилителя; d_5 и d_6 – подстраиваемое и неподстраиваемое изменения чувствительности; d_7 – неизвестный вид отказа. Для второй части сервопривода – РМ+П – подмножество видов отказов включает в себя 9 элементов: $D_i = \{d_8, d_9, \dots, d_{16}\}$, где d_8 и d_9 – засорение воздухопроводов допустимое и критическое; d_{10} , d_{11} и d_{12} – смещение нуля П, соответственно, неустранимое, устранимое положительное и отрицательное; d_{13} , d_{14} – обрывы питающего провода П положительного и отрицательного; d_{15} – обрыв сигнального провода П; d_{16} – неизвестный вид отказа.

В результате решения основных задач диагностирования сервопривода было сформировано дихотомическое дерево, представленное на рис. 4.16.

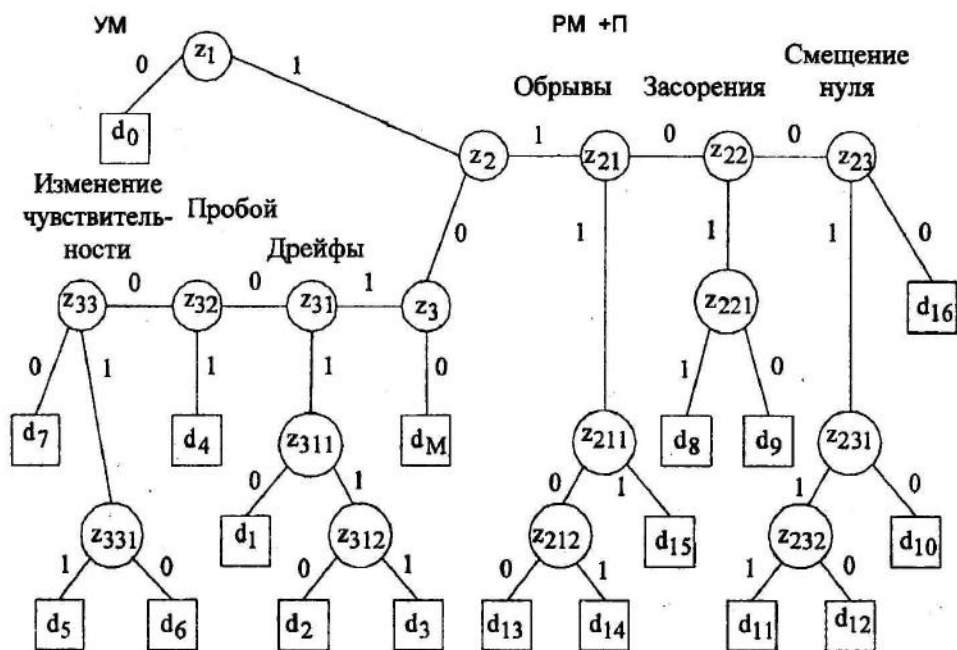


Рис.4.16. Дихотомическое дерево диагностирования сервопривода

Дерево начинается с признака z_1 , предикатное уравнение которого получено при решении задачи обнаружения отказов в следующей форме:

$$z_1 = S_2[|\tilde{U}_\Pi(k) - \hat{U}_\Pi(k)| - 0,005\hat{U}_\Pi(k)], \forall k \in [k_0, k'_1] \text{ с } p=0,9 \quad (4.78)$$

где $\tilde{U}_\Pi(k)$ - дискретные значения напряжения с потенциометра диагностируемого сервопривода; $\hat{U}_\Pi(k)$ - выходной сигнал эталонной модели; p - коэффициент доверия, определяющий на выборке $[k_0, k'_1]$ необходимое количество выполнении предиката для принятия заключения о равенстве признака $z_1=0$ или $z_1=1$. Если $z_1=0$, то это означает вид d_0 - в сервоприводе нет отказов. При $z_1=1$ переходим к поиску места отказа с помощью признака z_2 , полученного в результате решения соответствующей задачи в виде

$$z_2 = S_2[|\Delta\tilde{U}_\Pi(k) - \Delta\hat{U}_\Pi(k)| - 0,005\Delta\hat{U}_\Pi(k)], \forall k \in [k_0, k'_1] \text{ с } p=0,9, \quad (4.79)$$

здесь $\Delta\hat{U}_\Pi(k)$ - преобразованный сигнал с потенциометра, в целях исключения влияния люфта и описываемый уравнением

$$\Delta\hat{U}_\Pi(k+2) = \left(2 - \frac{T_0}{\tilde{T}}\right)\Delta\hat{U}_\Pi(k+1) + \left(\frac{T_0 - \tilde{T} - \tilde{k}\tilde{T}_0^2}{\tilde{T}}\right)\Delta\hat{U}_\Pi(k) + \frac{\tilde{k}\tilde{T}_0^2}{\tilde{T}}[U_3(k+1) - U_3(k)], \quad (4.80)$$

где $\tilde{T}$ и $\tilde{k} = \tilde{k}_{PM}\tilde{k}_\Pi$ - текущие значения постоянной времени и коэффициента передачи $PM+\Pi$; $\Delta\tilde{U}_\Pi(k) = \tilde{U}_\Pi(k+1) - \tilde{U}_\Pi(k)$. $\Delta\hat{U}_\Pi(k)$ в уравнении (4.79) представляет собой выходной сигнал эталонной статической модели для $PM+\Pi$. При $z_2=1$ следует переход к установлению класса отказа; если $z_2=0$, то это означает, что отказа в $PM+\Pi$ нет, и производится переход к признаку z_3 . Признак z_3 формируется в соответствии с такими условиями:

$$z_3 = S_2[\tilde{U}_y(k) - k_{UM}[U_3(k) - \tilde{U}_\Pi(k)] - \delta_3], \forall k \in [k_0, k'_1] \text{ с } p=0,9, \quad (4.81)$$

где $\tilde{U}_y(k)$ - дискретные значения напряжения с выхода УМ; δ_3 - величина допуска. Если $z_3=1$, то отказ произошел в УМ и требуется определить его класс; при $z_3=0$ получаем заключение d_M означающее невозможность найти место отказа.

Установление класса отказов в $PM+\Pi$ осуществляется с помощью признаков z_{21} , z_{22} и z_{23} . К примеру, признак z_{21} характеризует обрывы проводов и описывается равнением

$$z_{21} = S_2[|\Delta\tilde{U}_\Pi(k+1) - \Delta\tilde{U}_\Pi(k)| - \delta_4], \forall k \in [k_0, k'_1] \text{ с } p=0,9, \quad (4.82)$$

где δ_4 - величина допуска на постоянство разностного сигнала потенциометра $\Delta\tilde{U}_\Pi(k)$.

Признаки z_{31} , z_{32} и z_{33} позволяют установить класс отказа в УМ. Так, признак z_{31} характеризует класс видов отказов, связанных с дрейфом нуля, и

описывается соотношением

$$z_{31} = S_2[|\Delta \tilde{U}_y(k+1) - \Delta \tilde{U}_y(k)| - \delta_5], \forall k \in [k_0, k_1] \text{ с } p=0,9, \quad (4.83)$$

где δ_5 – величина допуска на постоянство разностного сигнала усилителя $U_y(k)$.

Определение видов отказов в РМ+П производится с помощью признаков $z_{211}, z_{212}, z_{221}, z_{231}, z_{232}$. Например, в классе обрывов признаки z_{211} и z_{212} описываются уравнениями

$$\begin{aligned} z_{211} &= S_2[|\Delta \tilde{U}_{II}(k)| - \delta_6], \forall k \in [k_0, k_1] \text{ с } p=0,9; \\ z_{212} &= S_2[\delta_6 - \Delta \tilde{U}_{II}(k)], \forall k \in [k_0, k_1] \text{ с } p=0,9; \end{aligned} \quad (4.84)$$

где δ_6 – величина допуска на машинный нуль с учетом неточностей аналого-цифрового преобразования сигналов.

В УМ виды отказов определяются посредством признаков $z_{311}, z_{312}, z_{331}$. Так, в классе изменения чувствительности признак z_{331} описывается соотношением

$$z_{331} = S_2[\Delta \hat{K}_{УМ} + \delta_7], \forall k \in [k_0, k_1], \quad (4.85)$$

где $\Delta \hat{K}_{УМ}$ – оценочное значение изменения коэффициента усиления усилителя; δ_7 – граничное значение двух видов. Полученное дихотомическое дерево совместно с предикатными уравнениями, описывающими признаки, и условиями их вычисления, а также массивы данных сигналов сервопривода, параметров, коэффициентов и допусков представляют собой основу для эффективного построения и отладки программного обеспечения процесса диагностирования сервопривода.

Описанный в параграфе принцип организации алгоритмов диагностирования позволяет формировать из алгоритмических модулей, вычисляющих соответствующие характеристики отказов, конструктивную основу в виде древовидной схемы для использования современной информационной технологии при разработке и отладке программного обеспечения компьютерных систем диагностирования СУ.

ВЫВОДЫ

Изложенные в этой главе результаты проведенного исследования по решению второй комплексной задачи, связанной с разработкой взаимосвязанной совокупности теоретических методов решения основных задач технического диагностирования СУ, можно резюмировать следующим образом:

1. Разработаны методы решения задачи обнаружения отказов в СУ, позволяющие производить выбор оптимальной совокупности контролируемых косвенных признаков, формирование диапазона допустимых изменений показателя качества и построение классификационных процедур установления фактов появления и наличия отказов.

2. Предложена совокупность взаимосвязанных новых методов для решения задачи поиска места отказа. Последовательное применение этих методов дает возможность сформировать оптимальные по стоимостным критериям как безусловные, так и условные правила поиска места отказов с использованием булевых косвенных признаков в форме двужначных предикатных уравнений.

3. Сформулирована и решена новая задача установления класса отказа. Сформированные при этом методы решения, пригодные для широкого круга задач классификации отказов, позволяют построить оптимальные условные и безусловные правила определения классов отказов на основе использования оценочных значений прямых и косвенных признаков отказов соответствующих ДФМ.

4. Созданы методы решения впервые сформулированной задачи определения вида отказа. Эти методы позволяют формировать оптимальным образом булево признаковое пространство для видов отказов, а также строить оптимальные по стоимости правила определения видов отказов с применением принципов условного и безусловного поиска.

5. Предложен способ организации алгоритмов диагностирования СУ, приводящий к древовидной схеме алгоритмических модулей, сформированных в результате решения основных задач диагностирования. Древовидная схема является основой для использования современных информационных технологий разработки и отладки программного обеспечения процесса диагностирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблематика диагностирования систем автоматического и автоматизированного управления более трех десятилетий занимает умы многих исследователей. Среди главных проблем можно выделить следующие: построение диагностических моделей, адекватных аварийным режимам СУ; определение условий диагностируемости; обнаружение видов отказов и установление причин их возникновения.

Значительный прогресс в решении указанных проблем характерен для изделий цифровой техники. Чрезвычайная трудность решения главных проблем для динамических аналоговых изделий обусловлена рядом таких обстоятельств, как отсутствие хороших моделей видов отказов аналоговых компонент типа моделей выявления видов отказов по константному "0" и константной "1", широко используемых при диагностировании цифровых изделий; нелинейный характер задач вследствие нелинейной связи между выходными сигналами изделия и параметрами видов отказов и др.

Описанный в монографии сигнально-параметрический подход позволяет в значительной степени преодолеть ряд известных трудностей в решении главных проблем диагностирования систем управления различными объектами и процессами. Характерной особенностью подхода является применение концепции диагностической модели как математического описания, однозначно связывающего косвенные диагностические признаки с прямыми — признаками видов отказов. Использование диагностических моделей позволило структурировать главные проблемы и получить конструктивные решения.

Изложенные основы сигнально-параметрического подхода дают возможность для классов линейных, с гладкими нелинейными и с существенными нелинейностями динамических систем оценить их структурные и сигнальные свойства по отношению к заданному множеству

видов отказов, обеспечить их полную диагностируемость, формировать алгоритмы обнаружения любого из видов отказов, а также разрабатывать процедуры поиска места их возникновения, установления класса отказа и определения его вида.

Получаемое в результате использования подхода информационное и математическое обеспечение диагностирования представляет собой основу для формирования базы знаний компьютерных систем диагностирования и для решения более общей проблемы управления динамическими системами в условиях неопределенностей, порождаемых как различными видами отказов, так и изменяющимися характеристиками внешней среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные цифровые системы контроля и управления/ Под ред. В.А. Мясникова, В.П. Петрова. – Л.:Машиностроение, 1976. – 608 с.
2. Альсведе Р., Венгенр Н. Задачи поиска. – М.:Мир, 1982. – 368 с.
3. Аржененко А.Ю., Чугаев Б.Н. Оптимальные бинарные вопросники. –М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
4. Береговой Г.Т., Тищенко А.А., Шибанов Г.П., Ярополов В.И. Безопасность космических полетов.– М.:Машиностроение, 1977. – 264 с.
5. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.:ИЛ, 1960. – 400 с.
6. Бессонов А.А., Мороз А.В. Надежность систем автоматического регулирования. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
7. Блехман Н.Н., Мышкис А.Д., Поповко Я.Г. Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложений математики. – М.:Наука, 1990. – 360 с.
8. Борисов Ю. Миллиард рублей за ремонт // Труд. 1981.8 февр.
9. Брюле Д., Джонсон Р., Клетский Е. Отыскание неисправностей в технических устройствах // Зарубежная радиоэлектроника. 1961.№7. С. 123–137.
10. Вилски А. Обнаружение резких изменений в динамических системах // Обнаружение изменений свойств сигналов и динамических систем. / Под ред. М. Баивиль, А. Балвениста. – М.: Мир, 1989. – С. 121 – 145.
11. Гельфандбейн Я.А. Методы кибернетической диагностики. Идентификация функционирующих систем математическими моделями. – Рига: Зинатне, 1967. – 544 с.
12. Гельднер К., Кубик С. Нелинейные системы управления. – М.:Мир, 1987. – 368 с.
13. Гришин Ю.П. Обнаружение изменений в динамических системах // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. №5. С.42 – 53.
14. Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М. Динамические системы, устойчивые к отказам.– М.:Радио и связь, 1985.– 176 с.
15. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем.– М.:Радио и связь, 1986.– 256с.
16. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования / Под ред. Н.М.Синдеева.- М.: Транспорт, 1984.- 191 с.
17. Диагностические комплексы систем автоматического самолетовождения / Под ред. В.А. Игнатова.– М.:Траспорт, 1975.– 272с.
18. Диагностические системы стабилизации оборотов электродвигателей / А.С. Кулик, В.И. Успенко, Ю.В. Красников и др. // Системы управления летательных аппаратов. Харьков, 1981. Вып.6. С.41 – 47.
19. Доценко Б.И. Диагностирование динамических систем.–К.: Техніка, 1983.– 159с.
20. Дмитриев А.К., Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика.– М.:МО СССР, 1987.– 521с.
21. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем.–М.:Энергия, 1977.–536с.
22. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен.– М.: Мир, 1976.– 319с.
23. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем.– М.: Наука, 1979.– 432с.
24. Игнатьев М.Б., Мироновский Л.А., Юдович В.С. Контроль и диагностика робототехнических систем.– Л.: ЛИАП, 1985.– 160с.
25. Изерман Р. Цифровые системы управления.–М.: Мир, 1984.– 541с.
26. Карцев В.П., Хазановский П.М. Стихам не подвластен.–М.: Знание, 1980.– 192с.
27. Киншт Н.В., Герасимова Г.Н., Кац М.А. Диагностика электрических цепей.– М.: Энергоатомиздат, 1983.– 192с.

28. Корнаушенко Е.К. Диагностирование линейных дискретных систем при допусковом задании значений их параметров. // Электронное моделирование. 1989. №2. С. 51 – 55. №3. С. 49 – 54.
29. Корнаушенко Е.К. Поиск неисправных компонент в линейных системах, заданных структурными схемами // Автоматика и телемеханика. 1985. №3. С. 104 – 110. №4. С. 110 – 117. №12. С. 113 – 121.
30. Конструирование с помощью моделирующих функций алгоритмов диагностирования системы стабилизации оборотов электродвигателя / А.С. Кулик, В.И. Успенко, С.А. Ринсберг и др. // Автоматизированные системы управления летательных аппаратов. – Харьков, 1962. Вып. 4. С. 105 – 112.
31. Кулик А.С., Успенко В.И. Введение в теорию диагностирования непрерывных систем управления: Уч. пособие. - Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1982. - 96с.
32. Кулик А.С. Критерий диагностируемости линейных систем // Автоматизированные системы управления. Харьков, 1984. Вып. 5. С. 100 – 107.
33. Кулик А.С., Щербинин И.В. О диагностировании последовательного соединения линейного и нелинейного функциональных элементов // Системы управления летательных аппаратов. Харьков, 1985. С. 144 – 149.
34. Кулик А.С., Блажко А.П. Определение контрольных точек для диагностирования нелинейных систем управления // Радиоэлектроника летательных аппаратов. Харьков, 1984. Вып.13. С. 194 – 200.
35. Кулик А.С. Обеспечение отказоустойчивости сервопривода // Автоматика. 1986. № 5. С. 36 – 43.
36. Кулик А.С. Системный подход к обеспечению отказоустойчивости систем управления. Харьков, 1990. – 121с. – Рукопись деп. в ВИНТИ 14.01.91. №227–В91.
37. Кулик А.С. Использование структурной избыточности для обеспечения отказоустойчивости сервопривода // Тез. докл. VIII симпозиума по проблемам избыточности в информационных системах. Ч. 3. – Л., 1983. С. 108 – 110.
38. Кулик А.С. Отказоустойчивый сервопривод // Самолетостроение. Техника воздушного флота. 1986. Вып. 53. С. 64 – 71.
39. Кулик А.С. Использование принципа самоорганизации для сохранения работоспособности систем управления при дефектах элементов // Радиоэлектронные устройства в информационно-измерительных системах. Харьков, 1989. С. 111 – 120.
40. Кулик А.С. Исследование диагностируемости одного класса нелинейных систем по операторным моделям // Радиоэлектроника летательных аппаратов. Харьков, 1987. С. 102 – 106.
41. Кулик А.С. Сигнально-параметрический подход к диагностике дефектов в динамических системах // Автоматизация технологических процессов и производств. Харьков, 1988. С. 101 – 112.
42. Кулик А.С. Оценка степени диагностируемости линейных динамических систем // Радиотехнические системы и устройства. Харьков, 1988. С. 142 – 147.
43. Кулик А.С. Системный сигнально-параметрический подход к синтезу отказоустойчивых систем управления // Тез. докл. X симпозиума по проблемам избыточности в информационных системах. Ч. 3. – Л., 1989. С. 37 – 40.
44. Кулик А.С. Определение видов дефектов в динамических системах // Проектирование комплексно-автоматизированных производств. Харьков, 1990. С. 58 – 65.
45. Кулик А.С., Сироджа И.Б. Диагностирование динамических нелинейных систем // Тез. докл. III Всесоюз. науч.-техн. конф. "Проблемы нелинейной электротехники". Ч. I. Киев, 1988. С. 68 – 70.

46. Кулик А.С. Методы расчета цифровых систем управления.—Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989.— 95с.
47. Кулик А.С., Белошенко Ю.Л. Определение контрольных точек для поиска дефектов сервопривода // Радиозлектроника летательных аппаратов. Харьков, 1984. Вып. 13. С. 200 – 205.
48. Кулик А.С., Сироджа И.Б. Диагностирование в цифровых системах с неопределенной динамикой // Тез. докл. IX симпозиума по проблеме избыточности в информационных системах. Ч. 3.— Л., 1986. С. 48 – 50.
49. Кулик А.С. Диагностируемость линейных непрерывных систем // Автоматика и телемеханика. 1987, № 6. С. 148 – 155.
50. Кулик А.С. Диагностирование линейных динамических систем с использованием функций чувствительности // Электронное моделирование. 1986. № 4. С. 48 – 53.
51. Кулик А.С., Сироджа И.Б., Шевченко А.Н. Построение диагностических моделей при разработке диагностического обеспечения динамических систем. Ч. II. Харьков, 1990.—61с. —(Препринт/ ИПМаш АН УССР; №312.).
52. Кулик А.С. Диагностируемость линейных динамических систем // Докл. АН УССР. Сер. Физико-математические и технические науки. 1990. № 1. С. 68 – 71.
53. Кулик А.С., Сироджа И.Б. Диагностические модели динамических систем // АСУ и приборы автоматики. 1989. Вып. 19. С. 46 – 53.
54. Кулик А.С. Диагностируемость одного класса нелинейных систем // Автоматика. 1989. № 3. С. 95 – 101.
55. Кулик А.С., Сироджа И.Б. Информационное и алгоритмическое обеспечение диагностирования динамических систем.—Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989.— 107 с.

56. Кулик А.С., Сироджа И.Б., Шевченко А.Н. Поиск места и идентификация дефектов в динамических системах. Харьков, 1991. – 69 с.— (Препринт / Ин-т проблем машиностроения АН УССР, № 344).
57. Кулик А.С., Рубанов В.Г. Построение минимального диагностического теста для сложного технического объекта // Системы управления летательных аппаратов. Харьков, 1974. С. 136 – 141.
58. Кулик А.С., Рубанов В.Г., Соколов Ю.Н. О диагностике автоматических непрерывных систем с помощью фильтра обнаружения // Автоматика. 1976. № 4. С. 3 – 8.
59. Кулик А.С., Рубанов В.Г., Соколов Ю.Н. Синтез систем, приспособляющихся к изменениям параметров элементов и их отказам // Автоматика и телемеханика. 1978. № 1. С. 96 – 107.
60. Кулик А.С., Рубанов В.Г. Формально-логическая модель синтеза систем, приспособляющихся к неисправностям // Адаптивные системы автоматического управления. К., 1978. Вып. 6. С. 97 – 101.
61. Кулик А.С., Сироджа И.Б. Распознавание дефектов в нелинейных системах // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Математические методы распознавания образов". Ч. 6. 1989. С. 37 – 39.
62. Кулик А.С. Сигнально-параметрический способ диагностирования нелинейных динамических систем // Электронное моделирование. 1990. №3. С. 55 – 59.
63. Кулик А.С., Сироджа И.Б. Математическое обеспечение диагностирования динамических систем с существенными нелинейностями.— Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1990.— 101с.
64. Кулик А.С., Сироджа И.Б., Шевченко А.Н. Построение диагностических моделей при разработке диагностического обеспечения динамических систем. Ч. 1. Харьков, 1989.— 56 с.— (Препринт / ИПМаш АН УССР; №302).

65. Кулик А.С. Оценка диагностируемости линейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. 1992. № 1. С. 184 - 187.
66. Кулик А.С., Сироджа И.Б., Шевченко А.Н. Обнаружение дефектов в динамических системах. Харьков, 1990. – 37 с. (Препринт / ИТМаш АН УССР; № 334).
67. Кулик А.С. Автоматизация диагностирования систем управления летательных аппаратов. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1994. – 61 с.
68. Кулик А.С., Козий А.П., Отраднова Н.П. Стендовое компьютерное диагностирование пневматических сервоприводов. - Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1995. – 91 с.
69. Кулик А.С., Козий А.П., Отраднова Н.П. Стендовое компьютерное диагностирование гироскопических датчиков. - Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1995. – 63 с.
70. Кулик А.С., Новикова Е.А., Процко Н.Л. Комплекс полунатурного моделирования аварийных ситуаций ДПЛА // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, 1997. С. 156 – 158.
71. Кулик А.С., Нарожный В.В., Процко Н.Л. Обеспечение отказоустойчивости систем управления дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов // Тр. V укр. конференции по автоматическому управлению "Автоматика – 98". Киев, 1998. Ч. 2. С. 63 - 69.
72. Кулик А.С., Процко Н.Л. Замкнутое диагностирование классов отказов ДПЛА // Тр. V междунар. науч.-техн. конф. "Контроль и управление в сложных системах". Винница, 1999. Т. 3. С. 224 - 230.
73. Кулик А.С., Процко Н.Л. Иерархия диагностических моделей БПЛА // Системний аналіз, управління і інформаційні технології: Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Вип. 73. Харків: ХДПУ, 1999. С. 78 – 84.

74. Кулик А.С. Отказоустойчивое управление БПЛА // Механіка та машинобудування. 1999. № 2. С. 72 – 75.
75. Кулик А.С., Процко Н.Л. Формирование алгоритмов замкнутого диагностирования БПЛА // Успехи современной радиоэлектроники. М., 1999. Вып. 11. С. 77 - 80.
76. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
77. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ: В 3 т. – М.: Мир, 1978. Т. 3. Сортировка и поиск. – 844 с.
78. Ксенз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с.
79. Латышев А.В. Техническая диагностика методами идентификации. К., 1984. – 53 с. (Препринт / Ин-т проблем моделирования в энергетике; № 4.).
80. Латышев А.В. Диагностирование непрерывных систем и цепей. К., 1990. – 47 с. (Препринт / АН УССР Ин-т проблем моделирования в энергетике; № 90–35).
81. Лебедев А.М., Орлова Р.Т., Пальцев А.В. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.
82. Ленивец С.Д., Малышенко Ю.В., Огнев Н.Д. Система автоматизации функционально-параметрического диагностирования "Восток". Владивосток, 1988. – 37 с. (Препринт / ДВО АН СССР Ин-т автоматики и процессов управления с вычислительным центром.).
83. Лигум Т.И., Скрипниченко С.Ю., Шнимеров А.В. Аэродинамика самолета ТУ-154Б. – М.: Транспорт, 1985. – 263 с.
84. Линник Ю.Ю. Метод наименьших квадратов и основы математической теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962. – 211 с.
85. Майоров А.В., Москатов Г.К., Шибанов Г.П. Безопасность функционирования автоматизированных объектов. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.

86. Мартыненко В.С. Операционное исчисление. – К.: Вища шк., 1973. – 268 с.
87. Методы анализа и синтеза структур упраздяющих систем / Под ред. Б.Г. Волика. – М.: Энергия, 1988. – 296 с.
88. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1980. № 8. С. 96 – 121.
89. Мироновский Л.А. Аналоговое и гибридное моделирование. Многомерные системы: Учеб. пособие. – Л.: ЛИАП, 1986. – 88 с.
90. Мищенко В.А. Метод селектирующих функций в нелинейных задачах контроля и управления. – М.: Сов. радио, 1973. – 184 с.
91. Мозгалеvский А.В., Калявин В.П., Костанди Г.Г. Диагностирование электронных систем. – Л.: Судостроение, 1984. – 224 с.
92. Мозгалеvский А.В. Техническая диагностика (непрерывные объекты) (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1978. №1. С. 145 – 166.
93. Морозов К.Е. Математическое моделирование в научном познании. – М.: Наука, 1969. – 210 с.
94. Неуймин Я.Г. Модели в науке и технике. – Л.: Наука, 1984. – 200 с.
95. Воробьев В.А., Зыль В.П., Кузнецов С.В., Бестугин В.А. Новые методы технической эксплуатации и технического обслуживания авиационного и радиоэлектронного оборудования / М.: ЦНТИ гражданской авиации, 1987. – 40 с. – (Сер. Воздушный транспорт. Обзорная информация.).
96. Описание АБСУ–134. Техническое описание по эксплуатации. – М., 1982. – 310 с.
97. Основы технической диагностики / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. Ч. 1. – 464 с.
98. Осуга С. Обработка знаний. – М.: Мир, 1989. – 293 с.
99. Отказоустойчивые системы управления // Отчет о патентных исследованиях. – Харьков: филиал ВЦПТУ, 1986. – 191 с.

100. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. – М.: Наука, 1973. – 584 с.
101. Потапов В.Н. Диагностирование авиационных электрических машин. – М.: Транспорт, 1989. – 101 с.
102. Пархоменко П.П. Теория вопросников (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1970. № 4. С. 140 – 152.
103. Разработка диагностического обеспечения и построение автоматизированных систем диагностирования и восстановления техники связи и управления / Под ред. С.П. Ксенза. – Л.: ВАС им. Буденного, 1984. – 224 с.
104. Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. – М.: Машиностроение, 1972. – 472 с.
105. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
106. Рубанов В.Г., Кулик А.С. Синтез оптимального алгоритма контроля работоспособности САУ по ее функционально–логической модели // Автоматика. 1975. № 4. С. 9 – 14.
107. Рвачев В.Л. Теория R–функций и некоторые ее приложения. – К.: Наук. думка, 1982. – 552 с.
108. Байда Н.П., Месюра В.Н., Ройк А.М. Самообучающиеся анализаторы производственных дефектов РЭА. – М.: Радио и связь, 1991. – 255 с.
109. Сигнально–параметрический подход к алгоритмизации автоматизированного принятия решений при поиске дефектов динамических систем / В.В. Александров, Н.Д. Горский, А.С. Кулик и др. – Ленинград, 1988. – 49 с. – (Препринт / Ин–т информатики и автоматизации АН СССР; № 78.).
110. Сердаков А.С. Автоматический контроль и техническая диагностика. – К.: Техніка, 1971. – 244 с.

111. Сироджа И.Б. Структурно-аналитический метод машинного распознавания объектов с разнотипными признаками // Теория R-функций и актуальные проблемы прикладной математики. К., 1986. С. 212 – 243.
112. Сироджа И.Б., Кулик А.С. Использование принципа самоорганизации для обеспечения отказоустойчивости систем управления // Тез. докл. II Всесоюз. науч.-техн. конф. "Живучесть и реконфигурация информационно-вычислительных и управляющих систем". Москва, 1988. С. 115 – 116. - (ДСП).
113. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 01.06.89.
114. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. – К.: Техніка, 1983. – 200 с.
115. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 411 с.
116. Устройства контроля и диагностирования систем автоматического управления. – Харьков: филиал ВЦПУ, 1984. – 112 с.
117. Фу К.С. Структурные методы распознавания образов. – М.: Мир, 1977. – 319 с.
118. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
119. Цыпкин Я.З. Релейные автоматические системы. – М.: Наука, 1974. – 576 с.
120. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
121. Чегис Н.А., Яблонский С.В. Логические способы контроля работы электрических схем // Тр. матем. ин-та им. В.А. Стеклова. – М., 1958. Т. 51. С. 270 – 360.
122. Чжен Г., Мэннинг Е., Метц Г. Диагностика отказов цифровых вычислительных систем. – М.: Мир, 1972. – 232 с.

123. Черановский О.Р., Кулик А.С., Садовничий С.Н. Автоматизация диагностирования систем управления летающих моделей при стендовых испытаниях. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1990. – 83 с.
124. Чернышев А.В. Технология монтажа и испытаний бортовых систем летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1977. – 336 с.
125. Шапиро А.Ш. Мероприятия ВВС США по улучшению безотказности и ремонтпригодности авиационной техники // Проблемы безопасности полетов. 1989. № 7. С. 69 – 83.
126. Штофф В.А. Проблемы методологии научного познания. – М.: Высш. шк., 1978. – 296 с.
127. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 676 с.
128. Экспертные системы. Принципы работы и примеры / Под ред. Р. Форсайта. – М.: Радио и связь, 1987. – 210 с.
129. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / Под ред. Р.М. Юсупова. – Л.: Энергия, 1978. – 192 с.
130. Элти Дж., Кумбе М. Экспертные системы: концепции и примеры. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 191 с.
131. Электронное моделирование. Т. 17. № 5, 6. 1995. Тематический выпуск "Техническая диагностика".
132. Beard R. V. Failure Accommodation in Linear Systems Through Self-Realization. Ph. D. Thesis, MIT, Cambridge, 1971, 324 p.
133. Clark R. M. Instrument Fault Detection // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. AES-14. – 1978. – #3. P. 456 – 465.
134. Clark R. M. Simplified Instrument Failure Detection Scheme // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. AES-14. – 1978. – #4. P. 465 – 473.

135. Duhamel P., Rault I.Ñ. Automatic test generation techniques for analog circuits and systems: A review // IEEE Trans. Circuits and System, 1979, #7, P. 411 – 440.
136. Frank P. M. Fault Diagnosis in Dynamic Systems via State Estimation – A Survey. University of Duisburg, FRG. – 1986. – 64 p.
137. Geiger G. Technische Fehlerdiagnose mittels Parameter schätzung und Fehlerklassifikation am Beispiel einer elektrischem angetriebenen Krisselpumpe. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt. VDI – Fortschrittsbericht. Reihe 6, VDI – Verlag, 1985. – 176 s.
138. Isermann R. Process Fault Detection Based on Modelling and Estimation Methods – A Survey. Automatica. – 1984. – #4. – p. 387 – 404.
139. Isermann R. Diagnosemethoden mit Modelbuilding-Prozessüberwachung und Fehler diagnose mit dynamischen Prozessmodellen // Verfahren und Systeme zur Technischen Fehler Diagnose. GMR – Bericht 1, 1984, ss. 167 – 190.
140. Janben K., Frank P. M, Entdeckung von Komponenten fehler in dynamischen system durch Hierarchische Zustandsschat rung // Automatisierungstechnik. – 1986. – H1. – s. 23 – 31.
141. Kulik A., Salyga V., Sirodga I. Synthesis Fault Tolerant Dynamic Control System with Fault Identification // Problems of Control and information Theory. Vol. 18(1), 1989, pp. 43 - 54.
142. Kulik A.S. Fault Diagnosis in Dynamic Systems via Signal-Parametric Approach // IFAC/IMACS Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process–SafeProcess' 91, sept. 10–13, Baden–Baden/FRG, vol. B., pp. 111–117.
143. Kulik A., Kozij A. Sensor unit Fault-Tolerance Enhancement by means of Failure Diagnosis and Serviceability restoration. Proc. IFAC Workshop on Intelligent Autonomous Vehicles. Southampton, UK, 1993, pp. 516 - 521.

144. Kulik A. Control Systems Fault Tolerant Ensuring by means of Fault Diagnosis and Counteracting. Proc. IFAC Symposium SAFEPROCESS' 94, Espo, Finland, vol.1, 1994, pp. 157 - 162.
145. Kulik A., Kozij A. Systems Fault-Tolerant Support for a Gyroscopic - Sensor Unit // Engineering Simulation, 1996, vol. 13, pp. 955 - 966.
146. Luenberger D. Observing the State of Linear System // IEEE. Trans. on Military Electronics. – 1964. – #2. – P. 74 – 80.
147. Rosenblueth A., Wiener N. The Role of Models in Science. Philis, 1945, vol. 12, #4, p. 316 – 321. Пер. в кн. Я. Г. Неймина Модели в науке и технике. – Л. : Наука, 1984. С. 171 – 175.
148. Saeks R., Sangovanni–Vincentelli A., Visvanthan V. Diagnosability of Nonlinear Circuits and Systems.– Part 2: Dynamical Systems // IEEE Trans. on Circuits and Systems.– 1981. #11. – pp. 1103 – 1108.
149. Sen N. , Saeks R. Fault Diagnosis for linear Systems via Multifrequency Measurement. // IEEE Trans. on Circuits and Systems. – 1979.– #7.– pp. 457 – 465.
150. Synthesis of Fault-Tolerant Dynamic Control Systems with Fault Identification / V.I. Salyga, I.B. Sirodga, A.S. Kulik and etc.– Problems of Control and Information Theory, vol. 18(1), 1989.– pp. 43 – 54.
151. Towill D.R. Automating Testing of Control Systems – Past, Present, and Future. Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers.– 1987.– vol. 57, #2, pp. 67 – 80.
152. Visvanthan V., Sangovanni–Vincentelli A. A Computational approach for the Diagnosability of Dynamical Circuits // IEEE Trans. on Computer-Aided Design.– 1984. CAD-3. – pp. 165 – 171.
153. Willsky A.S. A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems. Automatica, 1976, vol. 12, pp. 601 – 611.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУ	
ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ	10
1.1. Состояние, тенденции и задачи в области практического	
диагностирования СУ	10
1.2. Особенности СУ как объекта технического диагностирования	21
1.3. Диагностические модели СУ: состояние и тенденции.....	30
1.4. Анализ методов диагностирования СУ.....	42
1.5. Постановка научных задач исследования.....	52
ГЛАВА 2. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СУ	57
2.1. Основные положения	57
2.2. Диагностические функциональные модели для линейных СУ	64
2.2.1. Диагностические модели для "малых" отказов.....	65
2.2.2. Диагностические модели для "больших" отказов.....	70
2.3. Диагностические функциональные модели для СУ с гладкими	
нелинейностями	80
2.4. Диагностические модели для СУ с существенными нелинейностями..	89
2.4.1. Диагностические модели во временной области	91
2.4.2. Операторные диагностические модели.....	104
2.5. Диагностические логические модели.	108
Выводы.....	120
ГЛАВА 3. ДИАГНОСТИРУЕМОСТЬ СУ.....	121
3.1. Основные определения и положения	121
3.2. Диагностируемость линейных динамических систем	128
3.3. Диагностируемость динамических систем с гладкими	
нелинейностями	140
3.4. Диагностируемость динамических систем с	
существенными нелинейностями.....	149

3.4.1. Критерии диагностируемости систем по диагностическим	
моделям во временной области.....	151
3.4.2. Критерии диагностируемости систем по операторным	
моделям.....	157
3.5. Пути обеспечения диагностируемости систем.....	162
Выводы.....	171
ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУ	172
4.1. Обнаружение отказов	172
4.2. Поиск места отказа	185
4.3. Установление класса отказа.....	202
4.3.1. Методы построения алгоритмов оценки признаков	
классов для "малых" отказов.....	204
4.3.2. Методы построения алгоритмов оценки признаков	
классов для "больших" отказов.....	208
4.3.3. Формирование признакового пространства классов отказов	213
4.3.4. Построение правил установления классов отказов	217
4.4. Определение вида отказа	220
4.5. Организация алгоритмов диагностирования СУ.....	231
Выводы.....	241
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	242
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	244

Наукове видання

Анатолий Степанович Кулик

**Сигнально-параметрическое диагностирование
систем управления**

Анатолій Степанович Кулік

**Сигнально-параметричне діагностування
систем управління**

(російською мовою)

Редактор Л.О.Кузьменко
Комп'ютерна верстка Н.Л.Процко

Підп. до друку 7.04.2000. Формат 60×84 ¹/₁₆. Папір офсетний. Гарнітура "Таймс".
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 15.2. Облік.-вид. арк. 13.6. Тираж 300 прим.Зам. № 277.

Надруковано в типографії ООО "Техно-АРТ"

Харків, вул. Донець-Захаржевського, 4а/4б.