

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

ТАШКЕНТСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи
УДК 663.52:681.54

Капленко Евгений Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 5А521802 - “Автоматизация технологических
процессов и производств”

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени магистра

Работа рассмотрена на заседании
кафедры ИАУ и рекомендована
к публичной защите
(протокол № 41 от 05.06.2012 г.)

Научный руководитель:
к. т. н. Хамидов Б.Т.

« _____ » _____ 2012 г.

Зав. каф. Хамидов Б.Т.

« _____ » _____ 2012 г.

Рекомендована к публичной защите

Начальник отдела магистратуры
доц. Мухамедов К.

« _____ » _____ 2012 г.

ТАШКЕНТ – 2012

ВВЕДЕНИЕ	4
-----------------------	---

**ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ПРОБЛЕМЕ
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ САУ И КОНКРЕТИЗАЦИЯ
ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ**

1.1. Методы диагностирования САУ, основанные на использовании функциональных и логических диагностических моделей ОД.....	8
1.2. Методы диагностирования САУ, основанные на использовании аналитических диагностических моделей ОД.....	10
1.3. Анализ возможностей использования частотных характеристик для оценки технологического состояния САУ	14
1.4. Требования к диагностической модели и общие принципы её построения.....	17

**ГЛАВА 2. ТРЕБОВАНИЯ К ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ЕЁ ПОСТРОЕНИЯ**

2.1. Исходные предпосылки и основные допущения	23
2.2. Общие принципы построения ДМ.....	24

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ТОПОЛОГИИ ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

3.1. Алгоритм поиска путей в орграфе ОД.....	31
3.2. Алгоритм поиска контуров орграфа ОД.....	33
3.3. Определения касания контуров и путей в ДМ ОД.....	34

**ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНОЖЕСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ
ПАРАМЕТРОВ**

4.1. Формализация вычисления функций чувствительности амплитудных частотных характеристик ОД при ограничениях на топологию ОД	42
4.2. Формализация вычисления функций чувствительности частотных характеристик без ограничений на топологию ОД.....	45

ГЛАВА 5. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

5.1. Экспериментальные исследования алгоритмов диагностирования	51
5.2. Результаты исследования алгоритмов диагностирования во временной области.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЯ	89
СПИСОК ИСПЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	91

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное внедрение разнообразных технических систем, в частности систем автоматического управления, во все сферы жизни и деятельности человека характеризуется рядом особенностей, в числе которых - повышение ответственности выполняемых системой функций и рост цены ее отказа. Это обуславливает необходимость обеспечения таких качественных показателей функционирования систем управления, как надежность, безопасность, отказоустойчивость. В этой связи возрастает роль средств контроля и диагностирования систем управления.

Важное место в общей проблеме разработки высокоэффективных методов, алгоритмов и средств диагностирования непрерывных систем управления занимают задачи разработки методов поиска дефектов и построения и анализа диагностических моделей. Перспективным направлением здесь является использование структурных методов, которые делают акцент на структурных особенностях, общих для различных видов объектов диагностирования (ОД). Для адекватного описания проявления некоторых дефектов часто требуется изменять структуру динамической модели одного или нескольких блоков ОД, что может приводить к ошибкам диагностирования при решении задачи классификации технического состояния по диагностическим признакам в виде параметров модели неизменной структуры. Для устранения этого источника ошибок целесообразно исключить этап параметрической классификации из процесса определения технического состояния и строить диагностические признаки по блочному (структурному) принципу. В этом случае техническому состоянию каждого блока ОД ставится в соответствие величина одного диагностического признака и этап классификации технических состояний в параметрическом пространстве фиксированной размерности заменяется процедурой анализа значений диагностических признаков блоков. При этом становится возможным диагностирование в условиях изменения структуры моделей блоков (и размерности параметрического пространства). Структурный подход позволяет формализовать процессы построения диагностических

моделей линейных и нелинейных ОД и их анализа с целью определения различимости возможных в системе дефектов, назначения необходимого количества и расположения контрольных точек для обеспечения требуемого уровня контролепригодности. Анализ состояния вопроса по данной проблеме показывает, что перечисленные выше задачи решаются отдельно для временной и частотной областей анализа, для линейных и нелинейных ОД.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР.

Работа выполнялась с координационным планом научно-исследовательских работ Ташкентского химико-технологического института.

Цель работы состоит в решении научной задачи разработки структурных методов и алгоритмов построения и анализа диагностических моделей и поиска дефектов непрерывных систем управления во временной и частотной областях.

Объект и предмет исследования. В качестве объектов исследования использованы ГФУ (установка по производству бытового газа «Шутангаз» УП). Предметом исследования является программных средств для оптимизации процессов контроля и диагностирования автоматизированных систем управления ГФУ.

Методы исследований. В диссертационной работе использованы методы высшей и линейной алгебры, теории графов, методы теории управления, системного анализа и чувствительности систем управления. Проверка и исследование характеристик алгоритмов диагностирования осуществлялась путем их машинного моделирования.

Научная новизна. Разработан структурно-топологический метод анализа контролепригодности непрерывных САУ, основанный на использовании структурных методов теории чувствительности. Метод позволяет определять наличие эквивалентных дефектов, назначать контрольные точки для достижения заданной глубины поиска дефектов. Введено понятие допустимого на множестве контрольных точек преобразования диагностической модели, которое позволяет проводить анализ контролепригодности объекта и выбор

контрольных точек при поиске кратных параметрических дефектов, используя правила эквивалентных преобразований структурных схем.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием положений, доказанных методами высшей и линейной алгебры, теории управления и системного анализа, теории графов, теории чувствительности, а также результатами вычислительных экспериментов с помощью разработанных программных средств.

Практическая ценность. В работе разработана формализованная процедура построения и анализа диагностической модели САУ, основанная на структурно-топологическом и структурно-матричном описаниях.

Разработанные алгоритмы поиска одиночных структурных дефектов позволяют при сохранении результирующей глубины поиска дефектов понизить размерность решаемой задачи до числа контролируемых динамических элементов и используют нормированные диагностические признаки, позволяющие производить сравнительный анализ условий и результатов диагностирования объектов. Адаптивный алгоритм поиска одиночных дефектов позволяет повысить достоверность диагностирования в условиях наличия погрешностей динамических характеристик и неадекватности диагностической модели.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод и алгоритмы поиска одиночных структурных дефектов непрерывных САУ, основанный на использовании чувствительности частотных характеристик объекта к изменению частотных характеристик отдельных структурных единиц.
2. Метод и алгоритм поиска одиночных структурных дефектов непрерывных САУ, основанный на использовании структурных функций чувствительности выходных сигналов объекта диагностирования.

3. Адаптивный алгоритм поиска одиночных структурных дефектов с адаптацией по величине нормы отклонения динамических характеристик и уровню различимости дефектов.

Опубликованность результатов. Основное содержание магистерской диссертации опубликовано 2 научная работа.

Структура и объем диссертации. Магистерская диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, списка цитированной литературы. Она изложена на 103 страницах машинописного текста, проиллюстрированного 32 рисунками. Список литературы насчитывает 136 источников отечественных и зарубежных авторов.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ПРОБЛЕМЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ САУ И КОНКРЕТИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формализация процессов построения алгоритмов диагностирования некоторого объекта диагностирования (ОД) предполагает наличие формального описания его поведения в исправном и неисправном состояниях. Такое формальное описание (в векторном, графическом, табличном, аналитическом или ином представлении) будем называть диагностической моделью (ДМ) объекта. Вид ДМ в наибольшей степени влияет на выбор методов диагностирования САУ, поэтому в дальнейшем, при подробном анализе методов, он принят в качестве основного признака классификации. Классификация методов диагностирования проводится далее также по решаемым задачам диагностирования (проверка работоспособности, поиск дефектов), по используемым при диагностировании режимам работы объекта (статический, динамический), по виду диагностических параметров (показатели качества регулирования, коэффициенты передаточных функций или дифференциальных уравнений), по используемому математическому аппарату (теория распознавания образов, теория идентификации, теория чувствительности).

1.1. Методы диагностирования САУ, основанные на использовании функциональных и логических диагностических моделей ОД.

Функциональная модель используется для решения диагностических задач в том случае, когда объект может быть расчленен на ряд функционально связанных между собой частей, имеющих самостоятельное конструктивное оформление [2-5]. Эти модели широко использовались для решения задач минимизации числа контрольных точек и построения оптимальных процедур поиска дефектов [4,6-9].

Для САУ в качестве функциональной модели обычно можно рассматривать ее структурную схему, когда каждый динамический элемент САУ соответствует элементу функциональной модели. При излишней

детализации структурной схемы ее соответствия функциональной модели можно достичь объединением динамических элементов. Недостаток детализации обычно не наблюдается, поскольку каждый функционально обособленный элемент отдельно описывается в терминах передаточных функций [10,11].

С функциональной моделью сходна логическая модель, для получения которой каждый блок функциональной модели заменяется несколькими блоками, каждый из которых имеет один выход и существенные для данного выхода входы [3,12,13]. В частном случае логическая модель может совпадать с функциональной.

При использовании подобных моделей в ходе разработки диагностического обеспечения выбираются методы проверки работоспособности, основанные на измерении и оценке реакций объекта в контрольных точках на допустимые входные сигналы. Если реакции во всех контрольных точках допустимы, то объект считается работоспособным.

Для поиска дефектов в этом случае используются алгоритмы двух основных типов:

1) параллельные - когда реакции ОД измеряются во всех точках и для оценки технического состояния используются таблицы функций неисправности (безусловные алгоритмы диагностирования);

2) последовательные - когда проверка реакций ОД производится последовательно, причем выбор очередной проверки может осуществляться по различным критериям (по величине вероятности отказа элемента, по времени проверки, по информационному критерию, по минимальной стоимости реализации алгоритма поиска) [2,14].

Однако, использование функциональных и логических моделей не позволяет различать дефекты блоков, охваченных обратной связью [3,4]. Действительно, появление недопустимой реакции на выходе любого одного такого блока приводит к появлению недопустимых реакций на выходах всех остальных блоков, входящих в контур обратной связи. Как следствие получаем, что допустимое значение реакции на выходе любого одного блока,

входящего в контур обратной связи, может иметь место только тогда, когда допустимы реакции всех других блоков этого контура. Приведенные рассуждения показывают, что реакции всех блоков, охваченных обратной связью, всегда имеют одно и то же (допустимое или недопустимое) значение. Это является следствием простоты и "грубости" подобных моделей и приводит к необходимости разрывать обратные связи в САУ, что не всегда является возможным.

Логическая модель может быть представлена ориентированным графом, в котором вершинам поставлены в соответствие составные части объекта, входы и выходы, а дугам - связи между составными частями и внешними входами и выходами [15,16].

Рассмотренные виды моделей применяются при реализации допусковых методов технического диагностирования. Применение допусковых методов не всегда эффективно, так как не для всех объектов их техническое состояние с достаточной полнотой характеризуется тем, принадлежат или не принадлежат значения входных и выходных параметров объекта и его составных частей областям их допустимых значений. Кроме того, оказывается необходимым согласовывать системы допусков выходов одних составных частей с системой допусков входов других составных частей, непосредственно связанных с первыми.

1.2. Методы диагностирования САУ, основанные на использовании аналитических диагностических моделей ОД.

Аналитическая модель объекта технического диагностирования в общем случае может быть записана в виде

$$Y = A \cdot X, \quad (1.1)$$

где Y - вектор реакций ОД; X - вектор входных воздействий на ОД; A - оператор преобразования X в Y .

Собственно моделью ОД является оператор A , структура и параметры которого определяют показатели качества работы объекта. При этом задачи проверки работоспособности и поиска дефектов решаются

проверкой соответствия действительного оператора A заданному D [2]. Поскольку показатели качества работы динамических объектов зависят от вероятностных характеристик входных сигналов, оценку технического состояния ОД производят при определенном, фиксированном значении характеристик входных воздействий, то есть в одном и том же режиме работы ОД [17]. Поскольку, с точки зрения протекания процесса управления, требования к системе формулируются по трем основным направлениям [18]:

1) точность;

2) устойчивость;

3) качество переходного процесса, условия работоспособности САУ задаются обычно областью допустимых значений на параметры, характеризующие эти свойства (запасы устойчивости, время регулирования, перерегулирование, поведение в частотной области) [19-31]. Проверка работоспособности при использовании этого подхода обычно требует подачи на вход ОД специального тестового воздействия, то есть используются методы тестового технического диагностирования [32].

При проверке работоспособности в процессе функционирования САУ обычно используется метод, заключающийся в сравнении выходных сигналов САУ и эталонной модели, включенной параллельно объекту [17,24,28,33,34]. При этом необходимо удовлетворить противоречивым требованиям. С одной стороны, для повышения надежности проверки и удобства практического использования модель необходимо иметь наиболее простой. С другой стороны, поскольку работоспособность автоматической системы определяется комплексом характеристик качества, то естественно требовать эквивалентности модели объекту по всему комплексу этих характеристик. Подходы к понижению порядка диагностической модели при сохранении адекватности ее объекту описаны в работах [35-37].

Используя метод эталонной модели, для некоторых структур удается решить задачу контроля динамического звена при отсутствии доступа к входу и выходу этого звена [38].

Другой метод проверки работоспособности в процессе функционирования состоит во введении избыточности в исходную систему [39]. При этом объект дополняется специальной схемой, выходной сигнал которой связан с сигналом объекта известной алгебраической зависимостью [20]. При значительном отклонении параметров САУ от номинальных значений эта зависимость нарушается, что фиксируется схемой контроля. Если объект диагностирования обладает избыточностью [40], то устройство контроля значительно упрощается и представляет собой сумматор, на вход которого подаются сигналы от объекта, а выходной сигнал при правильном функционировании объекта будет являться константой.

Недостатком этих методов следует считать отсутствие информации о степени отклонения показателей качества переходного процесса, устойчивости САУ, поскольку применяется специфичное задание условий работоспособности.

Поиск дефектов в САУ может строиться в виде последовательности контрольных операций, осуществляемых по определенному плану. В результате этих операций определяются параметры, характеризующие состояние отдельных элементов САУ, и производится сравнение их с допустимыми значениями. При этом план поиска может основываться на известных статистических характеристиках элементов САУ [2,6], на информационной оценке процесса диагностирования [2,40-42] или на основе анализа структурных особенностей объекта [43-46]. Как правило, в этих методах используется статический режим работы ОД, что приводит к неполноте диагноза, так как объект по своей природе является динамическим. Кроме того, недостатками методов являются значительное суммарное время поиска за счет последовательной организации измерений, необходимость большого числа тестовых воздействий и разрыва связей между динамическими элементами.

Поиск дефектов САУ в динамическом режиме принципиально позволяют осуществлять методы, использующие алгоритмы распознавания образов [41, 47-52]. При этом распознавание состояний ОД может проводиться либо в

пространстве выходных сигналов объекта [49-51], либо в пространстве параметров модели САУ [52]. В последнем случае предварительно должна быть решена задача параметрической идентификации ОД. Алгоритмы распознавания могут применяться для диагностирования объектов, о которых имеется малый объем априорной информации, позволяют едиными методами осуществлять и проверку работоспособности, и поиск дефектов. Однако, они требуют сложных в реализации алгоритмов обучения в общем случае с нелинейными разделяющими поверхностями при наличии пересекающихся классов.

При распознавании состояний ОД в пространстве сигналов в динамическом режиме появляется необходимость понижения размерности системы признаков, для чего следует проводить исследование их информативности.

Для поиска дефектов в линейных САУ используются методы, развитые в теории идентификации [53-57]. Специфика процессов диагностирования при этом заключается в том, что известны структурные и топологические особенности ОД и идентификации подлежат лишь параметры передаточных функций отдельных ДЭ. Задача построения алгоритмов поиска дефектов при этом может решаться двумя путями.

Первый подход предусматривает с помощью методов идентификации определение коэффициентов передаточной функции всего объекта диагностирования, затем по известным уравнениям связи коэффициентов с параметрами отдельных ДЭ локализуется дефект [37,58]. Недостатком рассматриваемого подхода является необходимость решения системы нелинейных алгебраических уравнений относительно искомых параметров ДЭ. Для объекта со сложной структурой получение уравнений связи и решение этой системы уравнений является отдельной, довольно трудоемкой задачей. Изменение вида и особенностей этих аналитических зависимостей при изменении структуры ОД ограничивает универсальность и алгоритмизацию подобных процедур поиска дефектов. Поэтому используется и другой путь решения рассматриваемой задачи [17,29,48,59], когда с

помощью алгоритмов идентификации определяются непосредственно значения параметров, характеризующих техническое состояние отдельных ДЭ. При известных номинальных значениях параметров ДЭ и заданной структуре ОД и его модели решение задачи поиска дефектов может быть сведено к решению обратной задачи теории чувствительности [60,61]. Неудобства использования этого метода заключаются в сложности получения функций чувствительности динамических характеристик к изменению параметров, характеризующих техническое состояние ОД. Причем, с увеличением глубины поиска дефектов и/или сложности структуры ОД эти неудобства возрастают.

Тем не менее, применение теории чувствительности при разработке алгоритмов диагностирования САУ принципиально позволяет едиными методами решать задачи поиска дефектов [48,58,62], проверки работоспособности [21,29], выбора контрольных точек в ОД, определения классов эквивалентных дефектов (КЭД) и множества диагностических параметров [29,63,64]. Анализ приведенных литературных источников показывает, что решение перечисленных задач не достаточно формализовано, отсутствуют алгоритмы построения и анализа ДМ, поиска дефектов, анализа контролепригодности, не зависящие от особенностей структуры объекта диагностирования и использующие информацию о структурных особенностях ОД в качестве исходных данных. Между тем, разработка подобных алгоритмов диагностирования САУ открывает возможности создания универсальных в рамках рассматриваемого класса ОД методов разработки диагностического обеспечения (ДО), ориентированного на автоматизацию процессов диагностирования САУ в динамических режимах.

1.3. Особенности САУ как объектов диагностирования

Процессы диагностирования непрерывных САУ имеют свою специфику. Она состоит в том, что методы диагностирования должны разрабатываться и применяться с учетом особенностей структуры, условий эксплуатации и требований, предъявляемых к автономности и точности САУ [44].

Наиболее существенными особенностями САУ как объекта диагностирования являются следующие.

1. САУ являются динамическими системами, для которых наиболее объективной мерой качества является точность работы в переходном и установившемся режимах. Поскольку точность автоматических систем определяется показателями качества переходного процесса, при диагностировании необходимо использовать динамические характеристики.

2. Современные САУ являются сложными, многоэлементными системами с наличием замкнутых контуров обратной связи. В замкнутой системе все физические величины, представляющие воздействие одного ДЭ на другой, связаны в единую замкнутую цепь. Поэтому уравнения динамики всех ДЭ системы необходимо анализировать совместно, то есть оперировать с дифференциальными уравнениями высокого порядка.

3. Для непрерывных САУ характерна значительная доля (30-40%) [65,66] постепенных отказов, вызванных медленным изменением параметров, характеризующих техническое состояние отдельных ДЭ. Причем в процессе изменения технического состояния динамического элемента, как правило, изменяется несколько параметров, характеризующих его динамические свойства. В некоторых случаях процесс изменения технического состояния ДЭ может привести к изменению структуры его модели.

4. Вектор параметров динамических элементов СС вследствие производственного разброса значений параметров, их изменения в процессе эксплуатации является случайным по множеству ОД, что подтверждается экспериментальными данными [17,65,67].

5. Применение методов диагностирования, использующих параметры надежности, затруднено (особенно на этапе проектирования ОД) из-за отсутствия достаточных статистических данных об отказах тех или иных элементов и особенно об элементах вновь создаваемых. Кроме того, часто отсутствуют априорные данные относительно характера влияния тех или иных дефектов на свойства системы в целом, причем даже при наличии статистических характеристик, используемых в системе элементов, не всегда

оказывается возможным оценить надежность соединения и его влияние на свойства САУ (например, для системы с перекрещивающимися связями).

6. Необходимыми условиями работоспособности САУ являются ее устойчивость и грубость. При исследовании устойчивости приходится часто иметь дело с многоконтурными системами, в которых отдельные параметры могут изменяться в процессе настройки, изменения условий окружающей среды и режимов работы, а также в процессе нормальной работы за счет дрейфа. Грубость системы исключает значительное изменение процессов и показателей качества при малых изменениях параметров.

Перечисленные особенности накладывают ограничения на использование одних методов диагностирования и существенно усложняют использование других. Однако, реальные САУ обладают некоторыми особенностями, облегчающими применение тех или иных методов диагностирования.

7. Динамические характеристики всей САУ и отдельных ДЭ, входящих в ее состав, находят свое выражение в структуре и параметрах соответствующих передаточных функций. Поскольку динамические свойства непрерывной САУ являются объективной характеристикой ее технического состояния, такой же объективной характеристикой являются и параметры передаточных функций всей САУ и отдельных ДЭ при заданной структуре ДМ.

8. Как правило, бывает известна структура диагностируемой САУ, вид передаточных функций отдельных ДЭ, входящих в ее состав, и вектор номинальных значений параметров ДЭ.

9. Часто встречающиеся на практике непрерывные САУ удается с приемлемой точностью линеаризовать.

10. При разработке ДО непрерывных систем управления необходимо учитывать наличие традиционного, хорошо разработанного математического аппарата, используемого при анализе и синтезе этих систем: теория дифференциальных уравнений, представление сигналов в виде функциональных рядов, теория чувствительности, теория графов, частотные методы анализа.

11. Современные системы управления в своем составе зачастую содержат специализированную ЦВМ, которая может быть использована для решения диагностических задач, либо имеется возможность для этих целей использовать универсальную ЦВМ.

Большая информативность динамических режимов в сравнении со статическими обуславливает необходимость использования аналитических моделей для описания ОД.

Широко применяется диагностическая модель в виде описания объекта диагностирования в пространстве состояний [68- 86]. На основе таких моделей разработано несколько методов решения задачи функционального диагностирования динамических объектов, в частности, на основе наблюдателей состояния и соотношений паритета. В методе соотношений паритета для получения сигналов невязки используется "стратегия отсутствия обратных связей", в то время как в методе на основе наблюдателей состояния - "стратегия использования обратных связей"[79]. Для линейных систем метод соотношений паритета был предложен в работе [70] и развит в работах [80,81]. Решение задачи обнаружения дефектов в нелинейных системах на основе этого метода рассмотрено в работах [76,82]. Характеристики этого метода учитывают большую часть перечисленных выше особенностей САУ как объектов диагностирования и позволяют определять параметрические дефекты произвольной кратности при рабочем и тестовом диагностировании.

1.4. Анализ возможностей использования частотных характеристик для оценки технологического состояния САУ

Для количественного описания свойств линейных САУ в зависимости от постановки задачи используется те или иные взаимосвязанные их характеристики: весовая функция, передаточная функция, переходная характеристика, комплексный коэффициент передачи. Полную характеристику динамический свойств САУ даёт изменения его комплексного коэффициента передачи $\Phi(j\omega, \alpha)$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ . Геометрическое место точек конца вектора комплексного коэффициента

передачи представляет собой комплексную частотную характеристику объекта, соответствующую вектору параметров α

Частотные характеристики относятся к числу наиболее удобных описаний систем управления. Для экспериментального их определения существует достаточная совершенная электронная аппаратура.

Широкое распространение получили методы экспериментального определения частотных характеристик автоматических систем с использованием синусоидального входного воздействия путем измерения параметров выходной гармоники. Для фиксированного вектора α характеризующего техническое состояние САУ, частотные характеристики представляют совокупность точек, определяемых тремя координатами: частота ω , отношение амплитуд выходного и входного сигналов $A(\omega, \alpha)$, фазовый сдвиг этих сигналов $\varphi(\omega)$ (или частота ω , вещественная $\text{Re}\{\Phi(j\omega, \alpha)\}$ и мнимая $\text{Im}\{\Phi(j\omega, \alpha)\}$ составляющие комплексного Коэффициента передачи САУ).

Использование тестовых синусоидальных сигналов имеет ряд преимуществ при диагностировании САУ:

- можно ограничиться измерениями только на представляющих интерес частотах;
- легко проверяется гипотеза о линейности САУ;
- максимальную длительность эксперимента можно выбирать произвольно;
- генерирование и обработка таких сигналов изучены достаточно глубоко;
- в классической теории систем с обратной связью исследование устойчивости проводится с использованием гармонических сигналов;
- измерения частотных характеристик оказывается возможным проводить в форме активного эксперимента, обеспечивающего максимальную точность определения диагностических параметров;

-высока помехоустойчивость метода, так как снятие частотных связано со значительным подавлением помех путем когерентного интегрирования (синхронного детектирования)

К недостаткам следует отнести необходимость организации специального режима работы ОД (тестовое диагностирование) и опасность возбуждения объекта на резонансных частотах. Кроме того, рассмотренный метод требует наличия специальной аппаратуры и связан с проведением длительного эксперимента. Поэтому в ряде случаев частотные характеристики определяют с целью экономии времени и упрощения эксперимента по кривой переходного процесса при непериодическом воздействии на входе.

Комплексный коэффициент передачи $\Phi(j\omega, \alpha)$ линейного ОД может быть определён как отношение преобразования Фурье $Y(j\omega, \alpha)$ для функции $y(t, \alpha)$, характеризующей переходный процесс, и преобразования Фурье $X(j\omega)$ для входного воздействия $x(t)$, т.е.

$$\Phi(j\omega, \alpha) = \frac{Y(j\omega, \alpha)}{X(j\omega)} \quad (1.1)$$

где

$$Y(j\omega, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t, \alpha) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt;$$

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt$$

В большинстве случаев на вход ОД подаются типовые воздействия, в частности – единичное ступенчатое воздействия $x(t)=1(t)$. Получение характеристики $\Phi(j\omega, \alpha)$ с помощью преобразования Фурье при использовании ступенчатых входных сигналов гораздо проще, так как преобразования Фурье для единичной ступенчатой функции равно $X(j\omega)=1/j\omega$, и комплексный коэффициент передачи может быть определён следующим образом

$$\Phi(j\omega, \alpha) = j\omega Y(j\omega, \alpha) \quad (1.2)$$

При этом $\Phi(j\omega, \alpha)$ легко получается в цифровом выражении, если к переходной характеристике применяется цифровое преобразование Фурье (алгоритм быстрого преобразования Фурье [83–86]). В общем же случае, при произвольных входных воздействиях, получения частотных характеристик ОД с использованием преобразования Фурье входного и выходного сигналов, связано с делением двух комплексных чисел на многих частотах, поэтому данный метод довольно трудоемок даже при использовании быстрого преобразования Фурье. Кроме того, при выборе входных воздействий необходимо учитывать, что они должны содержать все частоты, представляющие интерес при анализе ОД. Например, если ступенчатый входной сигнал реализуется в виде возрастающей экспоненциальной функции времени $x(t)=1-\exp(-t/T)$, то самая высокая частота, которая может быть идентифицирована с помощью преобразования Фурье, равна $2\pi/T$ (идеальным случаем является $T=0$).

Наконец, возможно получение частотных характеристик ОД при рабочем диагностировании. В этом случае могут быть применены статистические методы, основанные на корреляционном анализе зарегистрированных случайных процессов на входе и выходе объекта. В случае, когда внутренние помехи в рассматриваемом ОД отсутствуют, комплексный коэффициент передачи определяется выражением:

$$\Phi(j\omega, \alpha) = \frac{S_{yx}(\omega, \alpha)}{S_x(\omega)} \quad (1.3)$$

где $S_{yx}(\omega, \alpha)$ - взаимная спектральная плотность процессов $y(t, \alpha)$ и $x(t)$; $S_x(\omega)$ спектральная плотность $x(t)$.

Для определения амплитудной и частотной характеристики $A(\omega, \alpha)$ ОД достаточно знать спектральные плотности случайных процессов на его входе $S_x(\omega)$ и выходе $S_y(\omega, \alpha)$:

$$A(\omega, \alpha) = \frac{S_y(\omega, \alpha)}{S_x(\omega)} \quad (1.4)$$

Использование этого метода связано с определенными ограничениями: исследуемые САУ должна быть линейной и иметь стационарные динамические характеристики. Кроме того, регистрируемые случайные процессы удовлетворяют условию стационарности.

Таким образом, существует ряд методов, позволяющих экспериментально определять частотные характеристики САУ как при тестовом, так и при рабочем диагностировании. При построении алгоритмов диагностирования на основе методов теории чувствительности необходимо информация о номинальных динамических характеристиках ОД. Для линейных ОД с номинальной передаточной $\Phi(p, \alpha_0)$ аналитическое выражение для номинальной комплексной частотной характеристики может быть получена простой заменой комплексного аргумента p на чисто мнимое значение $j\omega$. Это позволяет использовать топологическую формулу Мезона [18] Для передаточной функции между двумя произвольными вершинами графа прохождения сигналов при определении номинальных частотных характеристик ОД относительно любой рассматриваемой контрольной точки. Очевидно, что при этом необходимо наряду со структурной схемой ОД вводить в рассмотрение другой вид структурного изображения САУ – граф прохождения сигналов [18,19] . Использование графо – топологического способа описания ОД удобно и в процессе анализа диагностической модели при определении множества контрольных точек и классов эквивалентных дефектов.

Учитывая изложенное выше, представляется, что использованные описание САУ в частотной области позволяет достичь удовлетворительной степени формализации процессов диагностирования при одновременно применении простых инженерных методов структурных преобразований графических (графо-топологических) моделей ОД.

ГЛАВА 2. ТРЕБОВАНИЯ К ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ЕЁ ПОСТРОЕНИЯ

Диагностическая модель должна обеспечивать представление некоторой совокупности свойств ОД, необходимую и достаточной для отражения изменений в техническом состоянии объекта [1]. Проблема выбора формы представления диагностической модели САУ имеет принципиальное значение, так как принятый за основу вид модели во многом определяет пути разработки диагностического обеспечения, применяемый математический аппарат и в конечном итоге – эффективность методов диагностирования.

В настоящем разделе определены принципы построения структурно-топологической диагностические модели САУ в предложении, что это модель будет использована при диагностировании объекта по динамическим характеристикам в частотном области.

2.1. Исходные предпосылки и основные допущения

В качестве ОД рассматриваются линейные стационарные САУ объектами сосредоточенными параметрами. Предполагается, что объект диагностирования можно разбить на ряд динамических элементов имеющих один вход и один выход. При этом считается, что такое разбиение возможно произвести по конструктивному принципу так, чтобы каждый динамический элемент в конструктивном отношении представлял собой отдельную единицу или её известную часть. Функциональные блоки САУ разбиваются на отдельные ДЭ, либо их группа объединяется в один ДЭ в зависимости требуемой глубины диагностирования. Будем считать также, что имеется математическое описание свойств отдельных ДЭ в виде их передаточных функции и свойств ОД в виде структурной схеме. Такое допущение в полное приемлемо даже при построении ДМ на этапе проектирования САУ, когда уже конкретизирована структура и состав объекта. Ограничения на характер связей ДЭ между собой не накладываются и могут быть произвольными. Структурная схема САУ разбитая разбитая по изложенному выше принципу на отдельные ДЭ, является той исходной информацией, которая используется

для построения диагностической модели. Пример разбиения САУ скорости вращения двигателя постоянного тока на отдельные ДЭ показан на рис. 2.1.

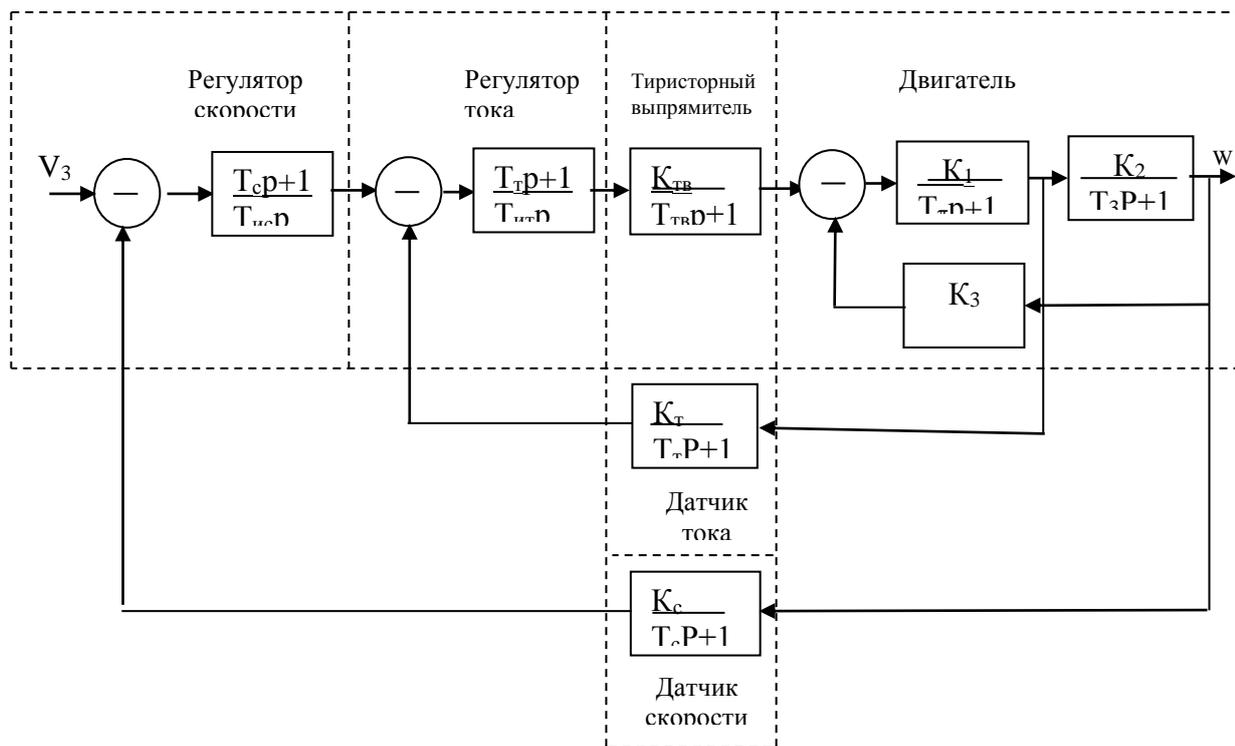


Рис.2.1. Структурная схема САУ с разбиением на отдельные ДЭ

2.2. Общие принципы построения ДМ

Методы построения диагностических моделей САУ должны удовлетворять ряду общих принципов системного подхода к исследованию систем управления [20,21]: однозначности, избыточности, последовательного раскрытия неопределенности.

Однозначное представление некоторой совокупности основных свойств для всего множества моделей САУ обеспечивает возможность применения общего системного подхода при диагностировании широкого класса систем управления. В качестве таких основных и общих свойств для рассматриваемого класса ОД далее будем считать топологические и структурные особенности САУ. Подструктурными особенностями САУ будем понимать структуру (то есть вид, порядок) передаточных функции отдельных ДЭ под топологическими особенностями понимается характер соединения

этих ДЭ в структурной схеме. Везде далее примем, что линейные динамические элементы описываются передаточными функциями вида

$$W_j(p) = \frac{\sum_{k=0}^{m_j} b_{jk} p^k}{\sum_{i=0}^{n_j} a_{jk} p^k} \quad (2.1.)$$

где a_{jk} , b_{jk} -коэффициенте передаточной функции j -го ДЭ (прямые показатели ДМ).

Диагностическая модель должна обеспечивать не избыточное представление совокупности свойств ОД, необходимое и достаточное для решения задач диагностики. Ведение избыточности увеличивает размерность задачи и усложняют процесс её решения. Так, представление ДЭ передаточными функциями (5) в общем случае является избыточным.

Для однозначного описания свойств динамических элементов коэффициент при нулевой степени p знаменателя будем приводить к единице. При наличии астатизма, приводить к единице будем коэффициент при низшей степени p знаменателя. Очевидно, что с устранением избыточности в ДМ связана и такие число диагностические задачи, как выбор подмножества контролируемых прямой показателей, несущих основную информацию о техническом состоянии ОД и появлением неопределенности. Другими словами, требования однозначности и не избыточности ДМ являются в некоторой степени противоречивыми и предполагают принятие компромиссного решения.

Принцип последовательного раскрытия неопределенности является одним из важнейших, особенно при построения ДМ с применением ЭВМ. Согласно этому принципу, построения диагностической модели должно производиться поэтапно так, чтобы на каждом этапе происходило некоторое приращение информации, позволяющее решать новые задачи по определению свойств ОД.

В работе [20] с целью обеспечения подобной организации процессов построения моделей систем управления в процессе синтеза последних введен ряд новых понятий, в частности, понятие ранга неопределённости моделей систем. Сохраняя принятую авторами терминологию, введём несколько иную градацию моделей с учетом специфики процессов диагностирования.

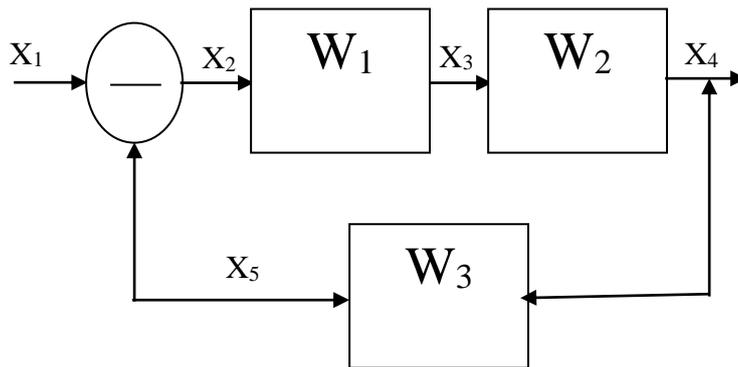
За начальный уровень описания ДМ примем модель ОД первого ранга неопределённости $M_{ОД}(1)=\langle X, G \rangle$, которая определяет множество переменных X и заданное на этом множестве бинарное отношение G , представляющее множество упорядоченных пар (i, j) индексов переменных, причём первый индекс – номер выходной переменной ДЭ, а второй – номер входной переменной ДЭ. Данная модель задаёт топологию ОД и является ориентированным графом. Если мощность множества G , задаваемого перечислением пар, обозначить через N , а мощность множества переменных X -через L , то задаваемый этой моделью граф будет иметь N дуг и L вершин. Везде далее будем предполагать, что граф ОД связный. На рис. 2.2. представлены примеры диагностических моделей первого ранга неопределённости в виде структурной схемы и сигнального графа. Отметим, что в общем случае мощность множества G не равна числу динамических элементов ОД и отличается от него на количество единичных дуг, то есть дуг с единичной передачей, введённых для возможности представления необходимых переменных в графе (см. рис. 2.2.,б).

Второй ранг ДМ – $M_{ОД}(2)$ - полностью конкретизированная структура операторов ДЭ и номинальные значения прямых показателей моделей этих ДЭ. Считается, что структура операторов ДЭ в общем виде соответствует приведенной в формуле (2.5) и задаётся массивом порядков числителей и знаменателей $m_i, n_i, i=1, \dots, N$, а также векторами номинальных значений прямых показателей каждого ДЭ:

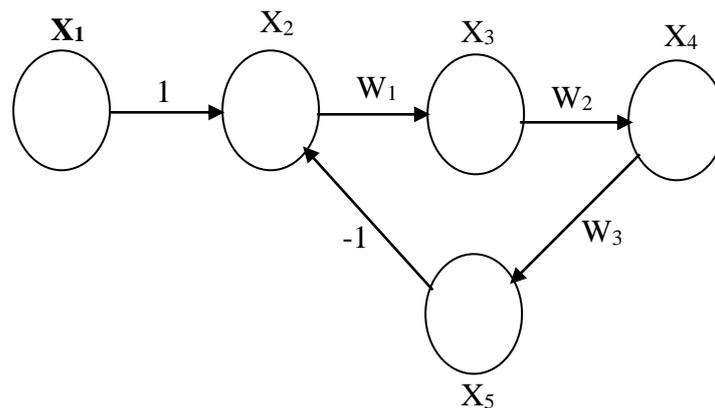
$$\bar{Q}_i = (a_{j0}, a_{j1}, \dots, a_{jn_i}, b_{j0}, b_{j1}, \dots, b_{jm_j})^T, j=1, \dots, N, \quad (2.2)$$

где N - число ДЭ в ОД.

Третий ранг диагностической модели – $M_{ОД}(3)$ - помимо отмеченного выше конкретизирует топологические особенности ОД (число контуров, число путей от входа к выходу, принадлежность дуг к тому или иному пути или контуру, касание контуров и путей и контуров между собой).



а)



б)

Рис.2.2. Диагностическая модель первого ранга неопределённости в виде структурной схемы (а), графа прохождения сигналов (б)

Четвёртый этап построения диагностической модели САУ связан непосредственно с решением диагностических задач. Модель четвертого ранга $M_{ОД}(4)$ задаёт множество контролируемых показателей, определяемое

вектором α_k . Для этого элементы векторов (6) необходимо упорядочить по их степени влияния на динамические характеристики ОД и часть наименее важных с этой точки зрения удалить из множества контролируемых при соблюдении, по возможности, принципа однозначности. На этом же уровне модель насыщается условиями работоспособности на множестве показателей качества регулирования, которые должны быть трансформированы в область контролируемых показателей. На этом этапе построения ДМ должен быть определён алгоритм поиска дефектов в ОД и произведены связанные с использованием этого метода вычисления (при использовании алгоритмов поиска дефектов на основе теории чувствительности на этом этапе вычисляются функции чувствительности соответствующих динамических характеристик ОД).

Пятый уровень ДМ $M_{ОД}(5)$ - задаёт множество контрольных точек в ОД, с которым связано множество контролируемых переменных $U \subseteq X$, а также классы эквивалентных дефектов на множестве контролируемых переменных U , определённые для фиксированных условий диагностирования (по контролируемому диапазону частот, числу используемых отсчётов частотных характеристик и их расположению на оси частот). Последовательность построения $M_{ОД}(5)$ может быть различной, в зависимости от двух постановок задачи:

- а) задано множества U и условия проведения поиска дефектов, на основании этой информации определяются классы эквивалентных дефектов;
- б) по заданным (допустимым) классам эквивалентных дефектов определяются условия диагностирования и множества U .

выше отмечалось, что исходной информацией при разработке диагностического обеспечения является структурная схема ОД, на которой динамическим элементам соответствуют определённые конструктивные элементы, и номинальные значения прямых показателей моделей ДЭ.

Поскольку, как было отмечено выше, исходной информацией при разработке диагностического обеспечения является структурная схема ОД и

номинальные значения прямых показателей моделей ДЭ, то получение моделей первого $M_{од}(1)$ и второго $M_{од}(2)$ рангов сводится к представлению этой информации согласно описанной выше форме и не требует пояснений. Далее будут рассмотрены вопросы построения ДМ остальных трех рангов.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ТОПОЛОГИИ ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Связь между топологическими особенностями САУ и их динамическими свойствами устанавливается с помощью выражений для определений систем и топологических формулы Мезона. Если этот путь используется для алгоритмизации вычисления частотных характеристик, то необходимо использования информации о модель третьего ранга $M_{ОД}(3)$.

При топологическом анализе САУ должны быть решены следующие задачи:

- 1) поиск всех контуров;
- 2) анализ касания контуров (определения пар, троек и т.д. не касающихся контуров);
- 3) поиск путей между интересующими исследователя вершинами граф - модели САУ;
- 4) анализ касания путей и контуров.

Модель $M_{ОД}(2)$, дополненная этой информацией, представляет собой модель третьего ранга, позволяющую проводить анализ ОД в частотной области.

Топологические особенности САУ с относительно простой взаимосвязью ДЭ, имеет место, например, в приведенной выше структурной схеме (см.рис.2.1), легко определяются чисто визуально, по геометрическим образом (рисункам структурных схем), представленным в привычной для анализе форме. Однако даже для относительно несложных нескольких выходов (контрольных точек) и анализ касания этих путей и контуров представляет достаточного трудоемкою задачу, связанную с индексацией ДЭ и переменных, и может сопровождаться ошибками. Эти топологи обстоятельства заставляют использовать специальные алгоритмы анализа топологии ОД. Кроме того, автоматизация топологического анализа ОД позволяет существенно снизить объём исходных данных для комплекса программных средств диагностирования САУ, что уменьшает трудоемкость подготовки задачи к решению и увеличивают универсальность диагностического обеспечения.

Поскольку на этапе построения модели $M_{ОД}(3)$ еще не определено множество контролируемых переменных U , так как контрольные точки его не заданы, анализ топологии выполняется не в полном объеме для определённых на данный момент контрольных точек. В дальнейшем, при уточнении контрольных точек модель $M_{ОД}(3)$ дополняется после получения модели четвертого ранга.

3.1. Алгоритм поиска путей в орграфе ОД.

Для поиска путей в орграфе предложены различные алгоритмы [2,20,22]. Для целей построения диагностической модели с учетом принятого способа задания топологии ОД на первом уровне ДМ удобным является применения достаточно эффективного алгоритма поиска путей, основанного на переборе с возвратом [20]. Исходные данными для этого алгоритма являются индексы n и m начальной и конечной вершин искомым путей и модель первого ранга в виде $M_{ОД}(1)=\langle X, \Gamma \rangle$, где Γ - отображение множества X само в себя такое, что $\Gamma(x_i)$ показывает причиной изменения каких переменных является переменная x_i .

Для нахождения путей $P_{mn}^k = \{ p_1^k, p_2^k, \dots, p_l^k \}$, $k=\overline{1, q_{mn}}$ где p_j^k – номер i -й вершины, входящей в k -й путь, выполняются следующие действия:

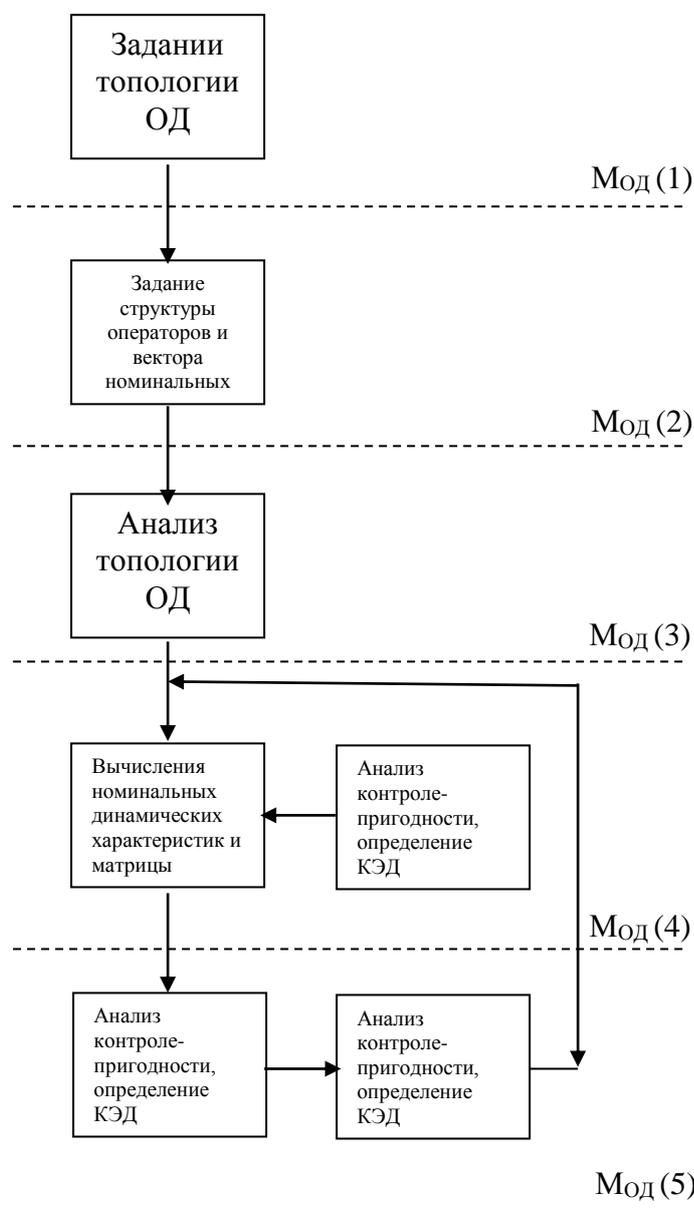
ШАГ 1. $k=1$.

ШАГ 2. $l=1, p_l^k = n$.

ШАГ 3. Выбрать из множества $\Gamma(p_l^k)$ вершину j , не содержащуюся еще в P_{mn}^k . Если такой вершины нет, то перейти на ШАГ 7.

ШАГ 4. $l=l+1$, включить $p_l^k = j$ в P_{mn}^k .

ШАГ 5. Если $p_l^k \neq m$, то перейти на ШАГ 3.



ШАГ 6. Включить p_{mn}^k в Π_{mn} , $k=k+1$.

ШАГ 7. $l=l-1$, если $l \neq 0$, то перейти на ШАГ 3.

ШАГ 8. Фиксация найденных путей на множество дуг.

ШАГ 9. Останов.

Результатом работы алгоритма является определения множества путей $\Pi_{mn} = \{P_{mn}^k\}$, заданное на множестве вершин графа. Однако поскольку для определения комплексных коэффициентов передач с использованием топологического подхода важно знать вхождения того или иного ДЭ в путь, то на шаге 8 производится фиксация путей на множестве упорядоченным пар индексов вершин G , т.е. определяется множество π_{mi} , $i = \overline{1, q_{mn}}$ номеров ДЭ,

входящих в каждый из q_{mn} прямых путей от входной вершины n до контрольной точки m . Алгоритм поиска путей является базовым при анализе топологии, так как на его основе можно строить алгоритмы поиска контуров.

3.2. Алгоритм поиска контуров орграфа ОД.

Если рассматривать контур в графе как замкнутый путь, то для поиска контуров можно использовать модифицированный алгоритм рассмотренный выше. Так, если зафиксировать две смежные вершины m и n , т.е. выбрать дугу (n, m) и найти все пути $\Pi_{mn} = \{P_{mn}^k\}$, $k = \overline{1, q_{mn}}$, то число найденных контуров будет равно q_{mn} , так как они образуются замыканием найденных путей дугой (n, m) , то её можно удалить из графа зафиксировать следующую дугу. Предварительно целесообразно удалить из графа все вершины, в которых одна из локальных степеней равна нулю, со всеми инцидентами им дугами (то есть удалить все стоковые и истоковые вершины и инцидентные им дуги). Описанные операции повторяются до получения нуля – графа. Процедура поиска контуров в этом случае может быть представлена в следующем виде.

ШАГ 1. $i=1$.

ШАГ 2. Удалить из графа все стоковые и истоковые вершины и инцидентные им дуги. Если получен нуль-граф, то останов.

ШАГ 3. Выбрать произвольную дугу (n_i, m_i) и применить алгоритм, описанный в пробел п. 2.3.1. для поиска множество путей Π_{mn} .

Зафиксировать результаты.

ШАГ 4. удалить из графа дугу (n_i, m_i) , $i=i+1$

ШАГ 5. Перейти на ШАГ 2.

Результатом работы алгоритма является найденные множество контуров мощностью K , заданная на множество вершин. По этой информации легко определить множества $\Omega_i, i = \overline{1, K}$ номеров динамических элементов, входящих каждый из этих контуров.

Используя найденные множество π_{mi} , $i = \overline{1, q_{mn}}$, $m = \overline{1, |Y|}$ и $\Omega_i, i = \overline{1, K}$, формализуем процессы определения касания контуров между собой и путей и контуров.

3.3. Определения касания контуров и путей в ДМ ОД.

Пусть ОД содержит N ДЭ и K контуров. Представим информацию о топологических свойствах ОД в несколько ином виде для этого сформируем следующие бинарные матрицы:

1) Матрицу путей $R_m = [r_{mij}]$ размером $q_m \times N$, где q_m – число путей от входа ОД до контрольной точки m ; $r_{mij} = 1$, если $j \in \pi_{mi}$;

$r_{mij} = 0$, если $j \notin \pi_{mi}$;

2) Матрицу контуров $V = [v_{ij}]$ размером $K \times N$, где $v_{ij} = 1$, если $j \in \Omega_i$; $v_{ij} = 0$, если $j \notin \Omega_i$;

3) Матрицу смежности дуг $B = [b_{ij}]$ размером $N \times N$, где $b_{ij} = 1$, если i -я и j -я дуги имеют общую вершину или если $j = i$; $b_{ij} = 0$ в противном случае.

Будем считать, что два контура или путь и контур не касаются, если они не имеют не одной общей вершины.

Рассмотрим матрицу $D_m = R_m * B * V^T = [d_{ij}]$, $m = \overline{1, |Y|}$ (3.1)

размером $q_m \times K$. Легко убедиться, что элементы этой матрицы обладают следующими свойствами $d_{ij} = 0$ если i -й путь j -й не касаются и $d_{ij} \neq 0$ в противном случае. Матрицы D_m назовем матрицами касания путей и контуров.

Аналогично, матрица

$F = V * B * V^T = [f_{ij}]$ (3.2)

размеров $K \times K$ имеет элементы такие, что $f_{ij} = 0$, если i -й и j -й контуры не касаются и $f_{ij} \neq 0$ в противном случае. Матрицу F назовём матрицей касания контуров.

Способ определения касания и путей с использованием матриц (3.1) и (3.2), очевидно является не единственным и не оптимальным в смысле объёма вычислений, тем не менее удобным, так как эти вычисления являются одноразовыми при построении ДМ, а использования бинарных матриц R_m , V удобно еще и на этапе вычисления определителей передач путей, миноров и всего комплексного коэффициента передачи ОД.

ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНОЖЕСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Ранее отмечалось, что размерность вектора контролируемых параметров α_k существенно влияет на степень обусловленности матрицы чувствительности S . С точки зрения повышения точности решения этой системы, уменьшения времени диагностирования, снижения используемых вычислительных ресурсов размерность вектора α_k необходимо уменьшать. Необходимость обеспечения достаточной полноты контроля и глубины поиска дефектов выдвигает противоположное требование.

Пусть объект диагностирования описывается вектором прямых показателей

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)^T,$$

элементы которого образует полную совокупность параметров ДМ. Процедура понижения размерности вектора α обычно производится в следующей последовательности [4,6].

1. Каждому элементу α_i вектора α ставится в соответствии элемент γ_i , характеризующий важность α_i по заранее сформулированному критерию.

2. Элементы γ_i , $i = \overline{1, M}$, располагаются в порядке их убывания, то есть определяется упорядоченное множество элементов важности параметров

$$\Gamma = \{ \gamma_{i_1}, \gamma_{i_2}, \dots, \gamma_{i_m} \}$$

и соответствующее ему упорядоченное множества параметров

$$A = \{ \alpha_{i_1}, \alpha_{i_2}, \dots, \alpha_{i_m} \}$$

3. Из множества A выделяется подмножество контролируемых параметров $A_k = \{ \alpha_{k_1}, \alpha_{k_2}, \dots, \alpha_{k_v} \}$ мощностью v ($A_k \subseteq A$, $v \leq M$). При этом каждому элементу $\alpha_i \in A$ ставится в соответствие величина

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha_i \in A \\ \phi, & \text{иначе} \end{cases}$$

4. Вычисляется величина

$$S(v, A_k) = \frac{\sum_{i=1}^M r_i \cdot \gamma_i}{\sum_{i=1}^M \gamma_i}$$

называемая функцией полноты контроля [6] или достоверностью алгоритма [4]. Значение достоверности алгоритма $S(v, A_k)$, вычисленное согласно формуле (2.11), должно быть не меньше требуемого S^* .

На практике некоторые элементы множества (2.10) оказываются функционально зависимо друг от друга. Так, при появлении некоторых дефектов в динамическом элементе могут изменяться сразу несколько параметров, характеризующих этот элемент. Поскольку глубина поиска дефектов при использовании рассматриваемого метода ограничивается степенью детализации структурной схемы, а некоторые ДЭ характеризуется несколькими параметрами, то число параметров можно уменьшить без уменьшения числа контролируемых ДЭ. С учетом этого можно решать рассматриваемую задачу в следующей постановке:

- 1) минимизировать v при $S(v, A_k) \geq S^*$;
- 2) минимизировать v при контроле всех ДЭ и $S(v, A_k) \geq S^*$ (динамический элемент считается контролируемые, если контролируется хотя бы один характеризующий его параметр).

Решение задачи в первой постановке заключается в последовательной удалении последних элементов множества A до тех пор, пока выполняется условие $S(v, A_k) \geq S^*$. Очевидно, что в этом случае v будет минимально при соблюдении ограничения по $S(v, A_k)$.

Для решения задачи во второй постановки наряду с контролем достоверности при удалении наименее значимых параметров необходимо контролировать, не является ли очевидно отбрасываемый параметр единственным (или последним), описывающим соответствующим ДЭ. Если это так, то он оставляется во множестве и производится анализ следующего по значимости параметров.

Следует отметить, что решение задачи во второй постановке целесообразно тогда, когда коэффициенты значимости γ не учитывают характеристики надежности, т.е. когда все ДЭ считаются равно надежными. Если же информация о надёжности используется, то решение задачи в первой постановки приведёт к удалению из множества контролируемых наиболее надёжных ДЭ.

Как видно, определяющие роль при решении рассматриваемый задачи играет формулировка критерия важности параметров α .

Динамические свойства линейной САУ с передаточной функцией $\Phi(p)$ полностью описываются комплексной частотной характеристикой

$$\Phi(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$$

Для описания динамических свойств можно воспользоваться либо зависимости $\Phi(j\omega)$ в комплексной области значения, либо одно из пар $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ или $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ вещественной области значения. Однако, если функция $\Phi(p)$ имеет только левые полюсы, то, как известно [2,7], между функциями $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ существуют взаимно однозначная связь, определяемая преобразованиями Гильберта

$$P(\omega) = -\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q(\lambda)}{\lambda - \omega} \cdot d\lambda ;$$

$$Q(\omega) = -\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P(\lambda)}{\lambda - \omega} \cdot d\lambda ;$$

Поэтому в асимптотически устойчивых системах любая из двух характеристик $P(\omega)$ или $Q(\omega)$ определяет переходной процесс.

Утверждение 1. необходимым условием работоспособности является устойчивость объекта диагностирования.

Это утверждение является достаточно очевидным поскольку объект не может выполнять возложенные на него функции, если он не является устойчивым. Учитывая изложенное выше, в качестве показателя работоспособности ОД (при соблюдении необходимого условия) можно использовать функционал

$$J = \int_{\omega_H}^{\omega_b} |P_H(\omega) - P(\omega)| d\omega \quad (4.1)$$

где $P_H(\omega)$ - номинальная вещественная частотная характеристика; $P(\omega)$ - наблюдаемая вещественная частотная характеристика

Условия работоспособности ОД может быть задано в виде неравенство

$$J \leq J_{\text{дон}},$$

где $J_{\text{дон}}$ - допустимое функционала.

Частотная характеристика $P(\omega)$ зависит от параметров α_i , $i = \overline{1, M}$. Поэтому выражение для допустимого значения показателя работоспособности, сформулированного в виде (12), можно приближенно представить следующим образом

$$J = \int_{\omega_H}^{\omega_b} |\Delta P_{\text{дон}}(\omega)| d\omega \approx \int_{\omega_H}^{\omega_b} \left| \sum_{i=1}^M U_i(\omega) \cdot \Delta \alpha_{i \text{дон}} \right| \cdot d\omega, \quad (4.2)$$

$$\text{где } U_i(\omega) = \frac{\partial P(\omega)}{\partial \alpha_i};$$

$\Delta \alpha_{i \text{дон}}$ - допустимая вариация i -го параметра.

Выражения (13) можно записать в виде

$$J_{\text{дон}} = J_{1\text{дон}} + J_{2\text{дон}} + \dots + J_{M\text{дон}},$$

где $J_{k\text{дон}}$ - допустимая вариация показателя работоспособности, обусловленная изменением до допустимых пределов параметра α_k и определяемая выражением

$$J_{k\text{дон}} = |\Delta \alpha_k| \cdot \int_{\omega_H}^{\omega_b} |U_k(\omega)| \cdot d\omega \quad (4.3)$$

Значения функционала (4.3) характеризуют вклад k -го параметра в изменение степени работоспособности ОД и могут являться критерием значимости этого параметра.

Если известно вероятность безотказной работы P_i соответствующего динамического элемента, то критерий значимости можно сформулировать в следующем виде

$$J_{k\delta on} = \frac{|\Delta\alpha_k|}{P_i} \cdot \int_{\omega_H}^{\omega_b} |U_k(\omega)| \cdot d\omega \quad (4.4)$$

Функционалы (4.3) и (4.4) являются безразмерными и учитывают динамическую природу ОД.

Выбор того или иного способа получения функций чувствительности частотных характеристик во многом определяет степень автоматизации процессов диагностирования с применением разрабатываемого диагностического обеспечения ОД и универсальность диагностического обеспечения в рамках рассматриваемого класса объектов.

Учитывая сформулированное ранее требование к разрабатываемым алгоритмам анализа ДМ и поиска дефектов, определим следующие требования к алгоритмам вычисления функций чувствительности:

- 1) для успешного решения задачи поиска дефектов применяемые алгоритмы должны позволять вычислять функции чувствительности частотных характеристик для любой контрольной точки ОД;
- 2) алгоритмы вычисления функций чувствительности не должны зависеть от топологических и структурных особенностей диагностируемой САУ, а должны использовать эти особенности как исходные данные;
- 3) необходимость поиска дефектов в объектах с достаточно сложной структурой, большим числом динамических элементов и контролируемых параметров выдвигает требования высокой точности вычисления функций чувствительности;
- 4) форма представления функций чувствительности должна быть удобной для решения задач анализа ДМ (анализа контроле пригодности, выбора контрольных точек, определения неразличимых дефектов).

Достаточно полный обзор применяемых способов получения функций чувствительности дан в работе [3]. Все их можно разделить на две основные группы: экспериментальные и аналитические.

Экспериментальные методы получения функций чувствительности заключается в использовании специализированных устройств [3], содержащих

в своём составе модели чувствительности исследуемого объекта, поэтому использования этих методов не позволяет удовлетворять первым двум из сформулированных требований. Подробное остановимся на аналитических способах вычисления функций чувствительности частотных характеристик [3,11]. Рассмотрим эти способы на примере функции параметрической чувствительности $\frac{\partial A(\omega)}{\partial \alpha}$, имея ввиду, что они применимы для получения функций чувствительности других частотных характеристик.

1. Наиболее простой способ вычисления функций чувствительности заключается в использовании формул численного дифференцирования. Может быть использована, например, следующая формула:

$$\frac{\partial A(\omega)}{\partial \alpha} \approx \frac{A(\omega, \alpha + \Delta\alpha) - A(\omega, \alpha - \Delta\alpha)}{2 \cdot \Delta\alpha} \quad (4.5)$$

Как видно, формуле (4.5) является приближенной и для повышения точности необходимо применять более сложные формулы численного дифференцирования, что приводит к значительному увеличению объёма вычислений.

2. С учетом сформулированного выше третьего требования, желательно использовать точные методы вычисления функций чувствительности. Некоторые из таких методов основываются на использовании определённых особенностей рассматриваемых аналитических выражений. Например, рассматривается случай, когда параметр входит в передаточную функцию линейно [17]

$$W(p) = \frac{P_1(p) + \alpha \cdot P_2(p)}{P_3(p) + \alpha \cdot P_4(p)}, \quad (4.6)$$

где $P_i(p)$, $i = \overline{1,4}$ - полиномы, коэффициенты которых от α не зависят. Использование подобных алгоритмов ограничено и не представляется возможным при диагностировании САУ.

3. Более универсальным является способ вычисления функций чувствительности, когда частотные характеристики представляются как сложные функции. Пусть передаточная функция ОД представлена в виде

$$\Phi = \frac{\sum_{i=0}^m b_i p^i}{\sum_{j=0}^n a_j p^j},$$

где $a_0 = 1$, а коэффициенты $a_j, j = \overline{1, n}, b_i, i = \overline{0, m}$ зависят от параметра α .

В этом случае можно записать

$$A(\omega) = A[\omega, a_1(\alpha), a_2(\alpha), \dots, a_n(\alpha), b_0(\alpha), b_1(\alpha), \dots, b_m(\alpha)].$$

Дифференцируя $A(\omega)$ как сложную функцию, получим

$$\frac{\partial A(\omega)}{\partial \alpha} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial A(\omega)}{\partial a_k} \cdot \frac{\partial a_k}{\partial \alpha} + \sum_{k=0}^m \frac{\partial A(\omega)}{\partial b_k} \cdot \frac{\partial b_k}{\partial \alpha} \quad (4.7)$$

Данный способ является точным, однако как сомножители $\frac{\partial A(\omega)}{\partial a_k}, \frac{\partial A(\omega)}{\partial b_k}$,

так и сомножители $\frac{\partial a_k}{\partial \alpha}, \frac{\partial b_k}{\partial \alpha}$ зависят от топологических и структурных

особенностей ОД, поскольку значения m и n определяются как структурой динамическим элементов, так и способом их соединения, а аналитические зависимости $a_i(\alpha), b(\alpha)$ определяются этим же свойствами ОД. Поэтому универсальность рассматриваемого способа ограничена возможностью вариации номинальных значений элементов вектора параметров α при фиксированных топологии и структуре ОД. Реализация данного алгоритма на ЭВМ заключается в организации вычислений согласно выражению (19) с учетом функциональных зависимостей $a_i(\alpha), b(\alpha)$ для конкретного ОД, объём программы будет прямо пропорционален числу используемых контрольных точек в ОД. Это обстоятельство делает практически невозможным применение данного алгоритма при диагностировании сложных САУ, имеющих несколько контуров и десятки ПП ДМ.

Таким образом, при разработке универсального диагностического обеспечения САУ необходимо использовать другие, более универсальные,

алгоритмы вычисления функций чувствительности, например, основанные на использовании информации о топологии ОД.

Ниже рассматриваются пути формализации вычисления функций чувствительности при ограничениях и без ограничений на топологические особенности ОД.

4.1. Формализация вычисления функций чувствительности амплитудных частотных характеристик ОД при ограничениях на топологию ОД.

Для большого числа практически интересных случаев можно разбить исходную структурную схему ОД на динамические элементы так, чтобы топологические особенности графа прохождения сигналов удовлетворяли следующим требованиям:

- 1) между входной и выходной вершинами графа существует только один прямой путь;
- 2) отсутствуют непересекающиеся между собой и прямым путём контуры.

Этими свойствами, например, обладают сигнальные графы систем управления электроприводами постоянного тока с последовательной коррекцией (системы подниженного регулирования) [12]. Структурная схема электропривода с последовательной коррекцией (см.рис. 2.1) имеет ряд контуров регулирования, причем каждый последующий контур охватывает предыдущий, что обеспечивает выполнение требования касания контуров. Наиболее сильным с точки зрения диагностики является требования касания прямого пути со всеми контурами, что не позволяет произвольно выбирать контрольные точки в ОД.

Рассмотрим граф прохождения сигналов, представленный на рис. 4.1 электропривода с последовательной коррекцией (см. рис.2.1). Запишем множество номеров вершин графа, которые можно рассматривать как входные (контрольные точки) при соблюдении требований 1 и 2.: $Z=\{7,8,9,10,11,12\}$. Таким образом, мощность множества $Z-k=6$ при числе динамических

элементов $N=8$, что позволяет осуществлять достаточно полный анализ диагностической модели и решения задачи поиска дефектов.

Если для входной вершины n и выходной вершины m графа имеют место рассмотрения особенности топологии ОД, то передаточная функция между этими вершинами согласно формуле Мезона [7] будет определяться следующим выражением

$$\Phi_{nm}(p) = \frac{W_{nm}(p)}{\sum_{i=1}^k W_{oi}(p) + 1} \quad (4.8)$$

где $W_{nm}(p)$ - передаточная функция прямого пути между вершинами n и m ; k -число контуров в ДМ ОД; $W_{oi}(p)$ –передаточная функция i -го контура.

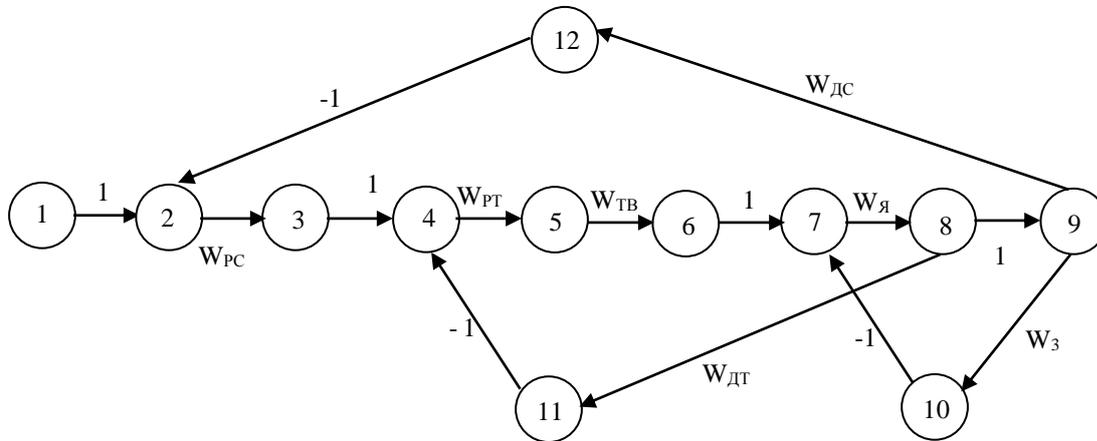


Рис.4.1. Граф прохождения сигналов объекта диагностирования

Обозначим, как и ранее, через π_m – множество номеров ДЭ, входящих в прямой путь; $\Omega_i, i=\overline{1, K}$ -множества номеров ДЭ, входящих в каждый из K контуров. С учётом выражения (20) комплексный коэффициент передачи между вершинами n и m можно записать в виде.

$$\Phi_{nm} = \frac{W_{nm}(\omega)}{\sum_{i=1}^k W_{oi}(j\omega) + 1} = \frac{A_m \cdot e^{j\varphi_m}}{\sum_{i=0}^k A_i \cdot e^{j\varphi_i}} = \frac{a(\omega) + jb(\omega)}{c(\omega) + jb(\omega)}, \quad (4.9)$$

где $A_m = \prod_{i \in \pi_m} A_i(\omega)$; $\varphi_m = \sum_{i \in \pi_m} \varphi_i(\omega)$; $a(\omega) = A_m \cos \varphi_m$;

$$a(\omega) = A_m \sin \varphi_m ; \quad c(\omega) = 1 + \sum_{j=0}^k A_j \cdot \cos_j ; \quad d(\omega) = \sum_{j=0}^k A_j \cdot \sin \varphi_j ;$$

$A_i(\omega)$, $\varphi_i(\omega)$ – соответственно амплитудная и фазовая частотные характеристики i -го ДЭ.

Опустим для простоты записи индексы n и m , имея в виду, что анализ производится для соответствующей контрольной точки. Используя известные соотношения между выражением (4.9) и $A(\omega)$ и, производя преобразования, получим выражения для амплитудной частотной характеристики ОД

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{a^2(\omega) + b^2(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)}} = \frac{\prod_{i \in \pi} A_i(\omega)}{\sqrt{c^2(\omega) + d^2(\omega)}} \quad (4.10)$$

Функции чувствительности амплитудной частотной характеристики $A(\omega)$ к изменению параметров α_i , $i = \overline{1, M}$ будем искать в виде

$$U_{\alpha_i}^A(\omega) = \frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \alpha_i} = U_{A_i}^A(\omega) \bullet U_{\alpha_{ii}}^{A_i}(\omega) = \frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \ln A_j(\omega)} \bullet \frac{\partial \ln A_j(\omega)}{\partial \alpha_i} \quad (4.11)$$

где параметр α_i характеризует динамические свойства j -го ДЭ. Если принят, что все ДЭ характеризуется передаточными функциями вида, то формулы для вычисления сомножителей $\frac{\partial \ln A_j(\omega)}{\partial \alpha_i}$ можно составить заранее.

Соответствующие формулы для амплитудных и фазовых частотных характеристик приведены в приложения 1.

Рассмотрим подробнее вопросы вычисления функций чувствительности $U_{A_j}^A(\omega)$. Аналитический вид этих функций будет зависит от положения j -го ДЭ в структурной схеме. Если ограничение на топологию ОД выполняется, то возможны следующие три варианта расположения ДЭ в структурной схеме.

1. ДЭ входит только в прямой путь, то есть $j \in \pi_m$, $j \notin \Omega_i$, $i = \overline{1, K}$.

Поскольку

$$U_{A_j}^A(\omega) = \frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \ln A_j(\omega)} = \frac{\partial A(\omega)}{\partial A_j(\omega)} \cdot \frac{A_j(\omega)}{A(\omega)}, \quad (4.12)$$

то, дифференцируя (4.10) с учетом выражения (4.12), получим

$$U_{A_j}^A(\omega) = 1. \quad (4.13)$$

2. ДЭ входит в несколько контуров и не входит в прямой путь, т.е.

$$j \in \bigcap_{i \in J} \Omega_i, \quad J \subseteq \{1, 2, \dots, K\}, \quad j \notin \pi_m. \text{ В этом случае в выражении (4.10) } A_i(\omega)$$

содержится только в знаменателе.

Дифференцируя с учетом этого, получим

$$U_{A_j}^A(\omega) = \sum_{i \in J} \frac{A_i \cdot [c(\omega) \cdot \cos \varphi_i + d(\omega) \cdot \sin \varphi_i]}{c^2(\omega) + d^2(\omega)}, \quad (4.14)$$

$$\text{где } A_i = \prod_{i \in \Omega_i} A_i(\omega); \quad \varphi_i = \sum_{i \in \Omega_i} \varphi_i(\omega).$$

3. ДЭ содержится и в прямом пути, и в подмножестве контуров, т.е. $j \in \pi_m$, $j \in \bigcap_{i \in J} \Omega_i$, $J \subseteq \{1, 2, \dots, K\}$.

Дифференцируя выражения (4.10) с учетом того, что $A_j(\omega)$ входит и в числитель, и в знаменатель, получим

$$U_{A_j}^A(\omega) = 1 - \sum_{i \in J} \frac{A_i \cdot [c(\omega) \cdot \cos \varphi_i + d(\omega) \cdot \sin \varphi_i]}{c^2(\omega) + d^2(\omega)} \quad (4.15)$$

Использование информации о топологии ОД в виде бинарных матриц путей и матрицы контуров позволяет с учетом выражений (4.9), (4.14), (4.15) организовать вычисления функций чувствительности на ЭВМ. Аналогично можно получить выражения функций чувствительности частотных характеристик $\varphi(\omega)$, $P(\omega)$.

Рассмотренные методы вычисления функций чувствительности являются точными.

4.2. Формализация вычисления функций чувствительности частотных характеристик без ограничений на топологию ОД.

Использование выражений (4.13-4.15) для вычисления функций чувствительности ограничивается не только топологическими свойствами ОД (отсутствия непересекающихся контуров), но и выбором той или иной выходной вершины, что определяют выполнения остальных ограничений. Это не позволяет на пятом этапе построения ДМ произвольно назначать

контрольные точки в ОД. Поэтому в ряде случаев могут оказаться необходимыми другие способы вычисления функций чувствительности частотных характеристик.

От указанных недостатков свободны структурные методы определения функций чувствительности [13,14], однако они не пригодны для целей диагностирования, поскольку помимо модели исходной системы требуют использования модели чувствительности.

Рассмотрим структурный алгоритм определения функций чувствительности частотных характеристик, не требующий использования модели чувствительности.

Представим комплексный коэффициент передачи ОД в полярных координатах

$$\Phi(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)},$$

где $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ - соответственно амплитудная и фазовая частотные характеристики.

Соотношения (28) продифференцируем по параметру α .

Получим

$$\frac{\partial \Phi(j\omega)}{\partial \alpha} = \left[\frac{\partial A(\omega)}{\partial \alpha} + jA(\omega) \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \alpha} \right] \cdot e^{j\varphi(\omega)} = \Phi(j\omega) \left[\frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \alpha} + j \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \alpha} \right]$$

или

$$\frac{\partial \ln \Phi(j\omega)}{\partial \alpha} = \frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \alpha} + j \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \alpha} \quad (4.16)$$

Пусть необходимо определить функцию чувствительности амплитудной частотной характеристики. Искомая функция есть вещественная часть выражения (4.16), то есть

$$\frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \alpha} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial \ln \Phi(j\omega)}{\partial \alpha} \right\}$$

Обозначим через $W_i(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи i -го ДЭ, который характеризуется параметром α . Тогда, учитывая что

$$\frac{\partial \ln \Phi(j\omega)}{\partial \alpha} = \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{\Phi(j\omega)},$$

$$\frac{\partial \Phi(j\omega)}{\partial \alpha} = \frac{\partial \Phi(j\omega)}{\partial W_i(j\omega)} \cdot \frac{\partial W_i(j\omega)}{\partial \alpha},$$

получим

$$\frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \alpha} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\Phi(j\omega)} \cdot \frac{\partial \Phi(j\omega)}{\partial W_i(j\omega)} \cdot \frac{\partial \Phi(j\omega)}{\partial \alpha} \right\}$$

Заменяя $\frac{\partial \Phi(j\omega)}{\partial \alpha}$ с учетом формула (29), окончательно получим

$$\frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \alpha} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{W_i(j\omega)}{\Phi(j\omega)} \cdot \frac{\partial \Phi(j\omega)}{\partial W_i(j\omega)} \left[\frac{\partial \ln A_i(\omega)}{\partial \alpha} + j \frac{\partial \varphi_i(\omega)}{\partial \alpha} \right] \right\}, \quad (4.17)$$

где $A_i(\omega)$ и $\varphi_i(\omega)$ - амплитудная и фазовая частотные характеристики i -го ДЭ ОД.

Отметим, что вычисление частных производных в квадратных скобках может производиться аналогично вычислению сомножителей $\frac{\partial A(\omega)}{\partial a_k}$, $\frac{\partial A(\omega)}{\partial b_k}$.

Подробнее остановимся на возможных подходах к формализации процессов вычисления сомножителей $\Phi(j\omega)$ и $\partial \Phi(j\omega) / \partial W_i(j\omega)$ в выражения

Пусть известна модель третьего ранга $M_{\text{ОД}}(3)$. Комплексный коэффициент передачи для фиксированной контрольной точки определим, используя формулу Мезона

$$\Phi(j\omega) = \sum_{i=1}^q \frac{W_{pi}(j\omega) \Delta_i(j\omega)}{\Delta(j\omega)} \quad (4.18)$$

где q -число прямых путей между входном и зафиксированной контрольной точкой; $W_{pi}(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи i -го прямого пути; $\Delta(j\omega)$ - определитель графа; $\Delta_i(j\omega)$ - i -й минор определителя.

Определитель находится по формуле

$$\Delta(j\omega) = 1 - \sum_i W_{oi}(j\omega) + \sum_{i,j} W_{oi}(j\omega) W_{oj}(j\omega) - \dots, \quad (4.19)$$

где $W_{oi}(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи i -го контура, а произведения под знаком суммы берутся для не касающихся контуров.

Вычисления определителя графа, миноров и передач путей удобно производить на ЭВМ с использованием ранее рассмотренных матриц R, V, F, D .

Предварительно сделаем несколько замечаний в отношении существования производной комплексной функции $\Phi(j\omega)$ по аргументу $W_i(j\omega)$. Будем считать, что определитель графа ОД на частотах анализа не обращается в ноль. Для того, чтобы функции

$$\Phi(j\omega) = P[(\omega), Q_i(\omega)] + jQP[(\omega), Q_i(\omega)]$$

определения в некоторой комплексной области G , было дифференцируема в точке $W_i(j\omega) = P_i(\omega) + jQ_i(\omega)$ этой области, необходимо и достаточно, чтобы функции $P[P_i(\omega), Q_i(\omega)]$ и $Q[P_i(\omega), Q_i(\omega)]$ были дифференцируемы в этой же точке и чтобы, кроме того, выполнялись условия Коши-Римана [15]

$$\frac{\partial P(\omega)}{\partial P_i(\omega)} = \frac{\partial Q(\omega)}{\partial Q_i(\omega)}; \quad \frac{\partial P(\omega)}{\partial Q_i(\omega)} = -\frac{\partial Q(\omega)}{\partial P_i(\omega)};$$

Замечание. Если две функции комплексного переменного $W_i(j\omega)$ и $W_j(j\omega)$ дифференцируемы в комплексной области G , то функции $W_i(j\omega) + W_j(j\omega)$, $W_i(j\omega) \cdot W_j(j\omega)$, $W_i(j\omega)/W_j(j\omega)$, ($W_j(j\omega) \neq 0$) также дифференцируемы в G .

Справедлива следующая теорема.

Теорема. **Комплексный коэффициент передачи, определяемый выражением (4.18), есть всюду аналитическая функция относительно любого из аргументов $W_i(j\omega)$, $i = \overline{1, N}$, за исключением изолированных особых точек, где $\Delta(j\omega) = 0$.**

Доказательство. Анализ выражений (4.18) и (4.19) с учетом определения минора определителя графа показывает, что любой из аргументов $W_i(j\omega)$, $i = \overline{1, N}$ входит в числитель и знаменатель выражения (4.18) линейно. Примем $W_i(j\omega) \neq 0$, так как $\partial W_i(j\omega) / \partial W_i(j\omega)$ всегда существует, то учитывая замечания, делаем вывод о дифференцируемости числителя и знаменателя выражения (4.18), а значит, согласно замечанию, и всей функции $W(j\omega)$ при условии, что определитель $\Delta(j\omega) \neq 0$. Теорема доказана.

Запишем производную по $W_i(j\omega)$ от выражения (4.18)

$$\Phi'(j\omega) = \sum_{i=0}^q \frac{(W'_{pi}\Delta_i + W_{pi}\Delta'_i)\Delta - W_{pi}\Delta_i\Delta'}{\Delta^2} \quad (4.20)$$

где штрих означает дифференцирование по $W_i(j\omega)$.

Так как либо $W_i(j\omega)$ входит в W_{pi} , Δ_i , Δ линейно, то их дифференцирование сводится к удалению слагаемых, где $W_i(j\omega)$ не содержится и удалению сомножителя $W_i(j\omega)$ в произведениях, где он содержится. Формализация вычислений по формуле (4.20) удобно производить с использованием ранее рассмотренных матриц R, V, F, D .

Таким образом, вычисление сомножителя

$$S_i(j\omega) = \frac{W_i(j\omega)}{W(j\omega)} \cdot \frac{\partial W(j\omega)}{\partial W_i(j\omega)} = \frac{\partial \ln W(j\omega)}{\partial \ln W_i(j\omega)}, \quad (4.21)$$

входящего в формуле (4.17), можно производить с использованием формул (4.18), (4.20). Значения комплексной частотной характеристики необходимы как для вычисления сомножителя (4.21), так и для определения номинальных частотных характеристик ОД, используемых при вычислении дополнительного движения.

Выражение (4.21) есть, по существу, логарифмическая чувствительность Φ_k изменению комплексного коэффициента передачи i -го ДЭ W_i и определяется топологией ОД и местом i -го ДЭ в структурной схеме, поэтому далее будем называть $S_i(j\omega)$ топологическим членом i -го ДЭ в выражении для функции чувствительности.

Для вычисления топологического члена (34) можно использовать другое аналитическое выражение, называемое формулой Линча [16]

$$S_j(j\omega) = \frac{(\Delta(j\omega))_j}{\Delta(j\omega)} - \frac{\left(\sum_{i=1}^q W_{pi}(j\omega)\Delta_i(j\omega) \right)}{\sum_{i=1}^q W_{pi}(j\omega)\Delta_i(j\omega)}, \quad (4.22)$$

где все обозначения совпадают с обозначениями в формуле (4.18), а $(\dots)_j$ означает вычисление содержимого скобок для графа, из которого исключена дуга j .

Таким образом при использовании формулы (4.22) необходимо вычислят $\Delta(j\omega)$, $W_{pi}(j\omega)$, $\Delta_i(j\omega)$ для графа, из которого удалена дуга j , а при использовании выражения (33) необходимо вычислят производные от этих же элементов.

ГЛАВА 5. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

5.1. Экспериментальные исследования алгоритмов диагностирования

Для исследования методов диагностирования в частотной области рассмотрим структурную схему, приведенную на рис.5.1, САУ отдельной степенью подвижности манипулятора, представляющую собой линеаризованный привод с электрическим двигателем постоянного тока и абсолютно жесткой механической передачей.

Передаточные функции ОД имеют вид:

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 * p + 1}; \quad W_2(p) = \frac{K_2 * (T_2 * p + 1)}{p}; \quad W_3(p) = \frac{K_3}{T_3 * p + 1};$$

$$W_4(p) = \frac{K_4}{T_4 * p + 1}; \quad W_5(p) = \frac{K_5}{p}; \quad W_6(p) = \frac{K_6}{p};$$

$$W_7(p) = K_7; \quad W_8(p) = K_8;$$

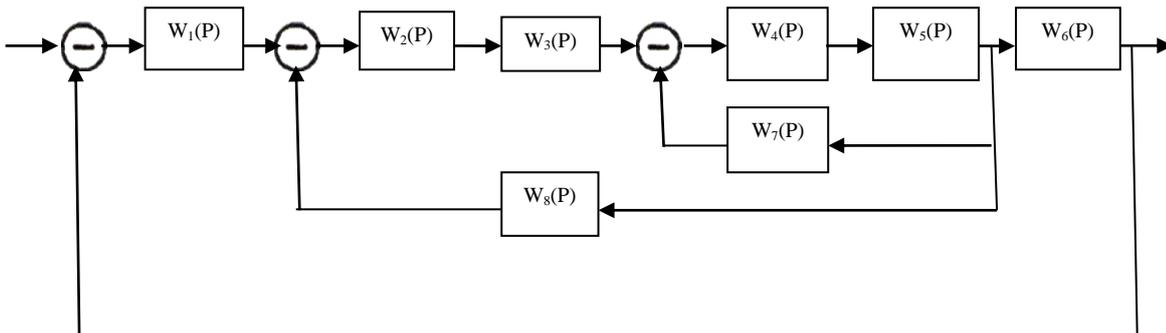


Рис.5.1. Структурная схема ОД №1

Номинальные значения параметров:

$$K_1=5, \quad T_1=0.001 \text{ с}; \quad K_2=10, \quad T_2=0,02 \text{ с}; \quad K_3=10, \quad T_3=0,003 \text{ с};$$

$$K_4=0,02, \quad T_4=0.01 \text{ с}; \quad K_5=10000, \quad K_6=0,0143, \quad ; K_7=0,2; \quad K_8=0,02.$$

На рис.5.2 показана номинальная амплитудная частотная характеристика ОД для выхода шестого ДЭ (регулируемый параметр).

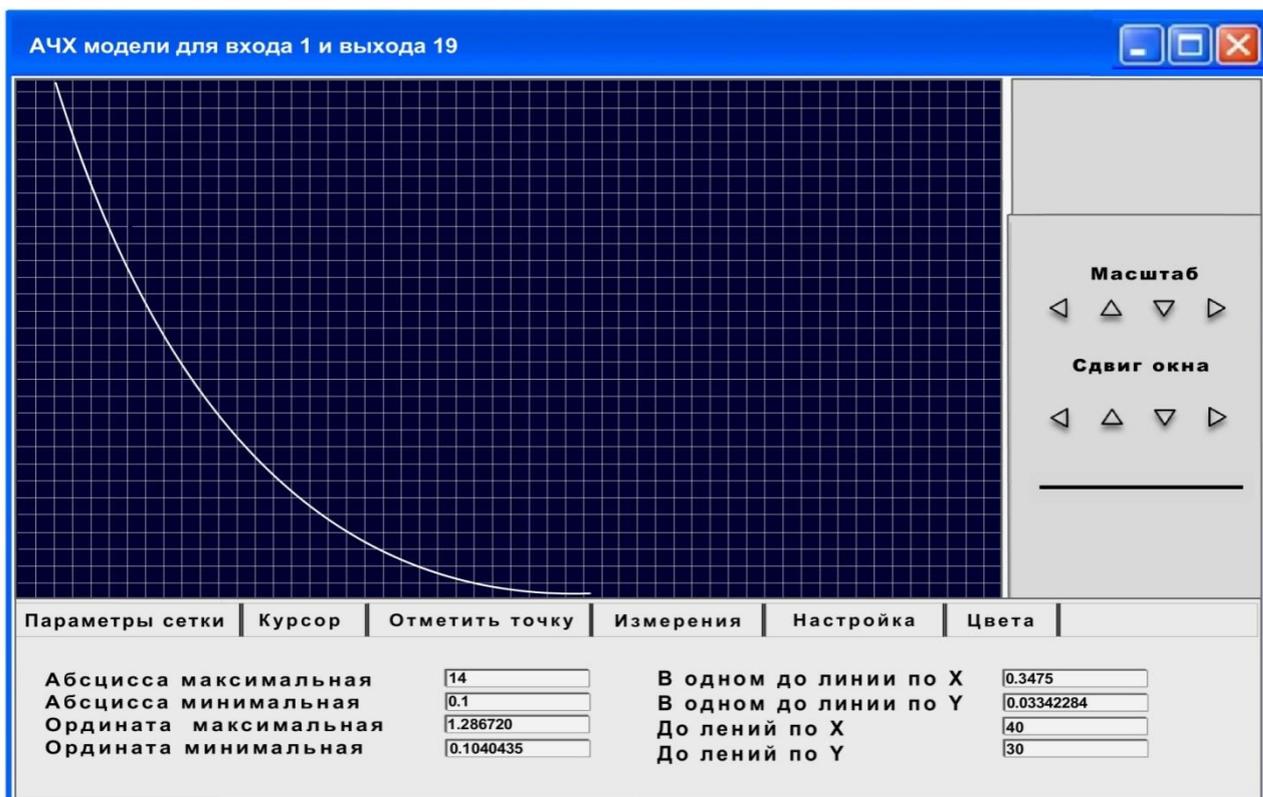


Рис.5.2. Номинальная АЧХ ОД для выхода 6

Как видно из рис.6.3, диапазон существенных частот лежит в пределах 0-20 с⁻¹.

Исследование алгоритмов диагностирования проводилось для диапазона частот от 0 до 10 с⁻¹, с шагом 0,1 с⁻¹, при использовании контрольных точек после каждого звена и относительных функций чувствительности амплитудных частотных характеристик.

Были получены следующие значения коэффициентов различимости структурных дефектов;

$$\begin{aligned} & \varnothing_{12} = 0,24; \varnothing_{13} = 0,75; \varnothing_{14} = 0,30; \varnothing_{15} = 0,75; \varnothing_{16} = 0,53; \varnothing_{17} = 0,67; \varnothing_{18} = 0,43; \\ & \varnothing_{23} = 0,75; \varnothing_{24} = 0,51; \varnothing_{25} = 0,80; \varnothing_{26} = 0,57; \varnothing_{27} = 0,74; \varnothing_{28} = 0,60; \varnothing_{34} = 0,78; \varnothing_{35} \\ & = 0,95; \varnothing_{36} = 0,84; \varnothing_{37} = 0,62; \varnothing_{38} = 0,84; \varnothing_{45} = 0,76; \varnothing_{46} = 0,75; \varnothing_{47} = 0,71; \varnothing_{48} = 0,29; \\ & \varnothing_{56} = 0,90; \varnothing_{57} = 0,97; \varnothing_{58} = 0,75; \varnothing_{67} = 0,76; \varnothing_{68} = 0,78; \varnothing_{78} = 0,75 \end{aligned}$$

При моделировании дефекта в первом ДЭ ($K_1 = 4$) и применении алгоритма поиска структурного дефекта были получены следующие значения диагностических признаков:

$$J_1^* = 0; J_2^* = 0,24; J_3^* = 0,75; J_4^* = 0,30; J_5^* = 0,75; J_6^* = 0,53;$$

$$J_7^* = 0,67; J_8^* = 0,43;$$

Апостериорные коэффициенты различимости первого дефекта имеют значения:

$$\Delta J_{12}^* = 0,24; \Delta J_{13}^* = 0,75; \Delta J_{14}^* = 0,30; \Delta J_{15}^* = 0,75; \Delta J_{16}^* = 0,53;$$

$$\Delta J_{17}^* = 0,67; \Delta J_{18}^* = 0,43.$$

Величины диагностических признаков указывают на наличие дефекта в первом блоке, так как значение первого диагностического признака минимально. На рис.5.3 представлена структурная схема объекта диагностирования № 2, представляющего собой азимутальный канал электросилового следящего привода (ЭСП) антенного устройства радиотелескопа в режиме «автосопровождение» [146]. ЭСП построен по схеме ЭМУ - исполнительный двигатель. Аппаратура ЭСП должна обеспечивать наведение антенного устройства по азимуту с заданной скоростью и ускорением. Схема содержит 19 динамических элементов, 7 замкнутых контуров обратной связи. Динамические свойства объекта диагностирования описываются следующими передаточными функциями:

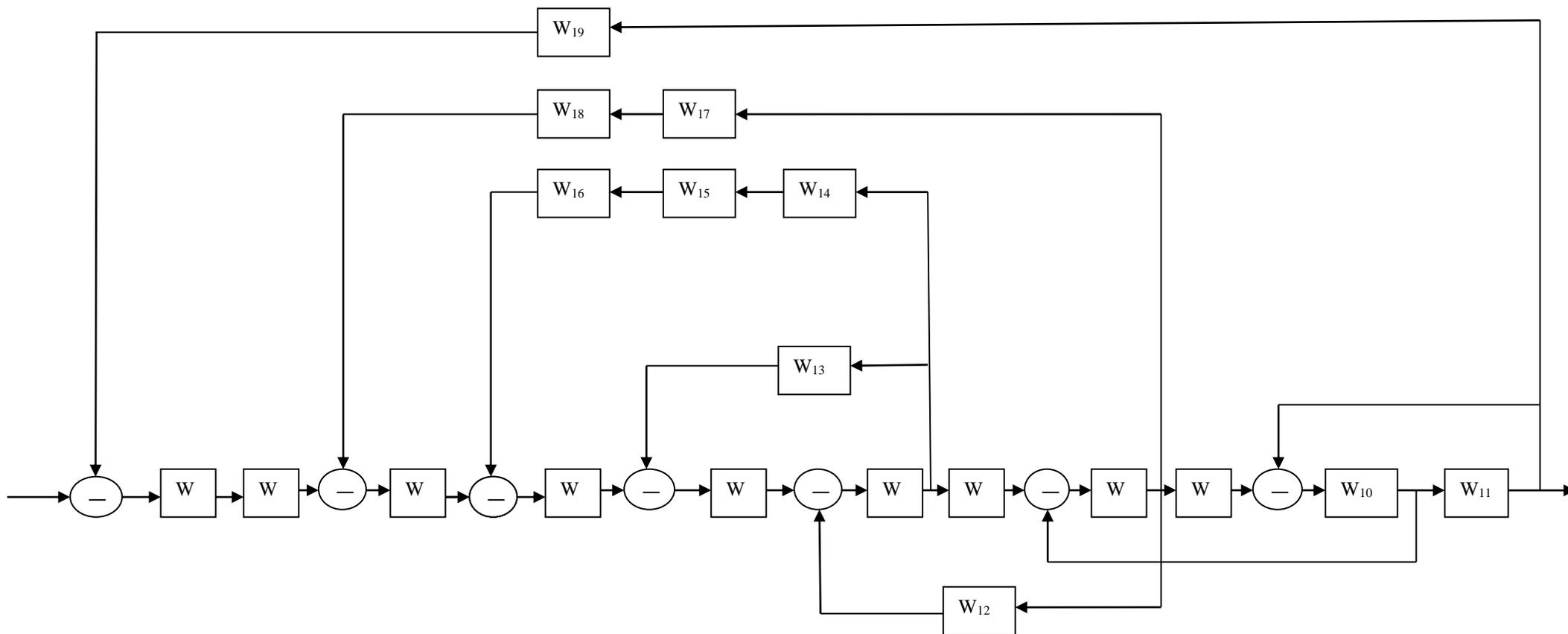
$$W_1 = 120.0; \quad W_2 = \frac{0.6p + 0.260}{p};$$

$$W_3 = 1.7; \quad W_4 = 100;$$

$$W_5 = \frac{1}{0.02p^2 + 0.02p + 1}; \quad W_6 = \frac{0.667}{0.0046p + 1};$$

$$W_7 = 0.12; \quad W_8 = \frac{125}{p};$$

Рис. 5.3. Структурная схема ОД №2



$$W_9 = \frac{1}{p}; \quad W_{10} = 0.000798p + 0.208;$$

$$W_{11} = \frac{1}{0.0013p^2}; \quad W_{12} = 1.2;$$

$$W_{13} = 1.4p + 0.7; \quad W_{14} = 0.0015;$$

$$W_{15} = 270; \quad W_{16} = \frac{0.74p}{3p+1};$$

$$W_{17} = 0.955; \quad W_{18} = 0.053;$$

$$W_{19} = 0.001.$$

Примем везде далее, что номера номерами ДЭ, на выходе которых контрольных точек, которое технически возможно организовать в объекте: $Z = \{1, 2, 3, 4, 11, 12, 14, 15, 17, 19\}$.

В ходе разработки диагностического обеспечения ЭСП антенного устройства с использованием программного комплекса были, решены следующие задачи:

- 1) выбор контролируемого диапазона частот для целей поиска дефектов;
- 2) упорядочение прямых показателей ДМ по степени их влияния на изменение частотных характеристик ОД;
- 3) определение необходимого множества контрольных точек для достижения максимальной глубины поиска дефектов;
- 4) выявление классов эквивалентных дефектов с использованием функционалов;
- 5) статистическое моделирование процессов возникновения и поиска одиночных параметрических и структурных дефектов в условиях наличия погрешностей измерения частотных характеристик и неадекватности используемой диагностической модели;
- 6) оценка зависимости достоверности диагностирования от погрешности измерения частотных характеристик и неадекватности ДМ при поиске одиночных дефектов.

При решении перечисленных задач первоначально было выдвинуто требование достижения максимальной глубины поиска дефектов, то есть

однозначного определения любого из 26 параметрических дефектов, либо любого из 19 структурных дефектов.

Назначение контрольных точек в ОД, необходимых для достижения требуемой глубины поиска дефектов, производилось с использованием структурно-топологического подхода, изложенного выше. Анализ ДМ проводился для случая поиска дефектов по амплитудным частотным характеристикам. Контрольная точка №11 необходима при диагностировании, поскольку является основным выходом ЭСП и должна использоваться также на этапе проверки работоспособности.

Согласно теореме 3.5 для устранения эквивалентных параметрических дефектов необходимо использование контрольных точек № 14 и № 17, согласно теореме 3.7 для устранения эквивалентных структурных дефектов, обусловленных эквивалентным положением ДЭ, необходимо использование этих же контрольных точек и контрольных точек № 1 и 15.

Таким образом множество контрольных точек $Z_1=\{1,11,14,15,17\}$ является необходимым и обусловлено особенностями топологии ДМ ОД.

Однако имитационное моделирование процессов возникновения и поиска дефектов с использованием различных частот в диапазоне $\Delta\omega_k=0.01-30 \text{ с}^{-1}$ (частота среза разомкнутого ОД равна $\omega_c=1.5 \text{ с}^{-1}$) показало плохую различимость дефектов ДЭ №1 и №19 (усилитель, датчик положения), №7, №8 (механическая часть), №9, №10 (механическая часть), вызванную параметрическими причинами. Плохая различимость выражается, в частности, в малых значениях коэффициентов различимости вида (4.25) для параметрических дефектов и вида (4,28) для структурных дефектов. Для множества контрольных точек Z_1 , диапазона контролируемых частот $\Delta\omega_k=0.25-6,25 \text{ с}^{-1}$ и относительных структурных функций чувствительности амплитудных частотных характеристик пять наименьших коэффициентов различимости имеют значения:

$$\begin{aligned} \varnothing_{119} = 0; \varnothing_{78} = 0; \varnothing_{910} = 0,00007; \varnothing_{212} = 0,00670; \varnothing_{218} = 0,0128; \varnothing_{619} = 0,0207; \\ \varnothing_{16} = 0,0207; \quad \varnothing_{512} = 0,0210; \varnothing_{1218} = 0,0367. \end{aligned}$$

Использование контрольных точек № 2, № 3, №4 (сигналы на выходах регуляторов положения, скорости и тока) позволило увеличить степень различимости дефектов внутренних контуров ОД. Для множества контрольных точек $Z_2=\{1,2,3,4,11,14,15,17\}$ и того же диапазона контролируемых частот семь наименьших коэффициентов различимости имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \varnothing_{119} = 0; \varnothing_{78} = 0; \varnothing_{910} = 0,0001; \varnothing_{811} = 0,0935; \varnothing_{711} = 0,0938; \varnothing_{218} = 0,160; \\ \varnothing_{1718} = 0,198. \end{aligned}$$

Использование контрольных точек № 12 и № 19 позволяет устранить эквивалентные дефекты 1 и 19 и увеличить различимость остальных. Для множества контрольных точек $Z_3=\{1,2,3,4,11,14,15,17,19\}$ имеем следующие три наименьших коэффициента различимости:

$$\varnothing_{78} = 0; \varnothing_{910} = 0,0007; \varnothing_{218} = 0,14.$$

Применение алгоритма поиска структурного дефекта в динамическом элементе № 7 с использованием множества Z_3 контрольных точек, относительных функций чувствительности и того же диапазона частот дает следующие два наименьших диагностических признака: $J_3^* = 0,223; J_1^* = 0,367$ при априорном коэффициенте различимости этих дефектов $\varnothing_{13} = 0,295$.

Таким образом, при использовании практически максимально возможного числа контрольных точек, определяемого множеством Z_3 , в объекте диагностирования имеет место пара неразличимых структурных дефектов №7и№8 и две пары плохо различимых дефектов. Коэффициент различимости параметрических дефектов в ДЭ № 7 и № 8 также имеет малую величину: $\varnothing_{78} = 0.0021$.

Для оценки качества разработанных алгоритмов поиска одиночных дефектов была исследована зависимость достоверности диагностирования ОД от погрешностей измерения частотных характеристик и неадекватности диагностической модели. Для получения этих зависимостей проводилось многократное отклонение прямых показателей ДМ от номинальных на

фиксированную величину, вычислялись амплитудные частотные характеристики, на которые накладывалась аддитивная погрешность их измерения. Для моделирования погрешностей измерения частотных характеристик использовалась программа генерации псевдослучайных чисел с нормальным законом распределения, нулевым средним и заданной дисперсией. Диапазон контролируемых частот определялся по максимальному количеству распознанных дефектов при фиксированном объёме выборки и фиксированной относительной среднеквадратической погрешности измерения амплитудной частотной

характеристики σ_A . Амплитудная частотная характеристика замкнутого объекта диагностирования для выходного сигнала датчика угла показана на рис 5.4. Ширина полосы пропускания ОД составляет $\Delta\omega_n = 0 - 2,7c^{-1}$, а диапазон существенных частот (на уровне 0.1) — $\Delta\omega_{сч} = 0 - 14c^{-1}$. Наилучшие результаты при диагностировании были получены для контролируемых частот

$\Delta\omega_k = 0,25 - 6,25c^{-1}$ при использовании 25 отсчетов частотной характеристики, взятых с шагом $\Delta\omega = 0,25c^{-1}$

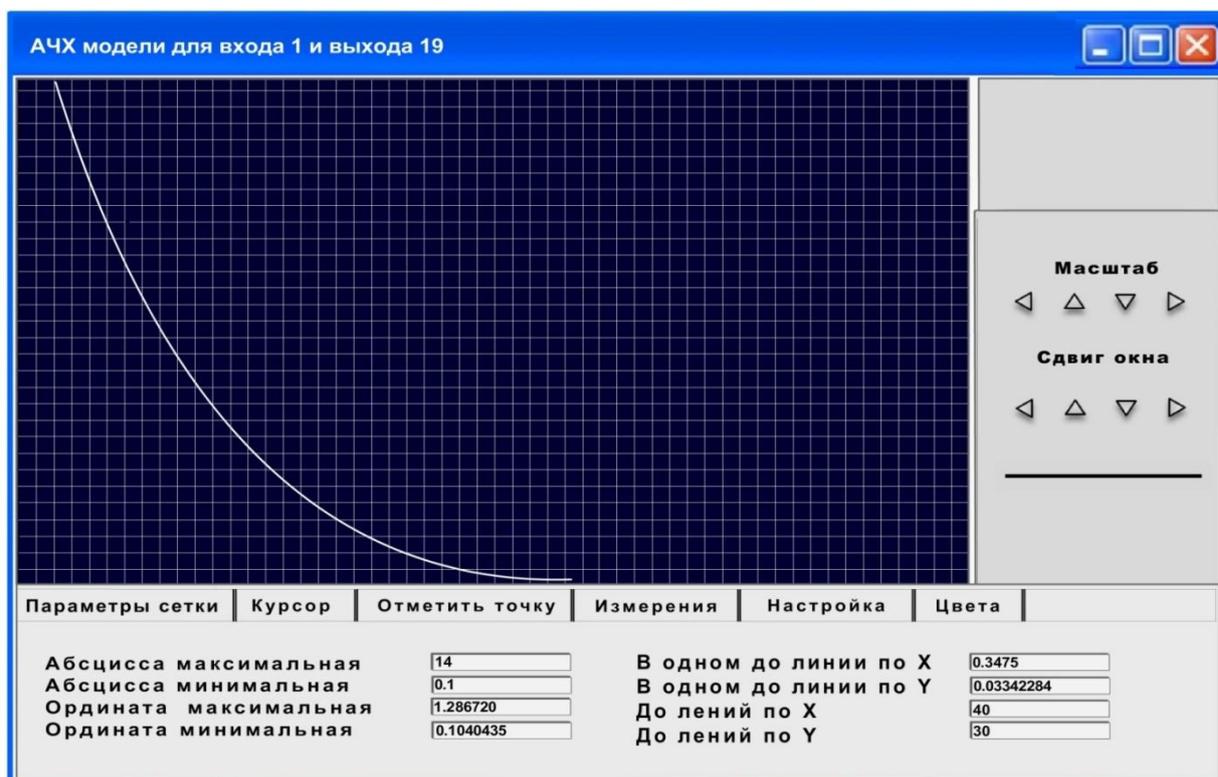


Рис.5.4. амплитудная частотная характеристика ОД №2

На рис.5.4 показана зависимость оценки достоверности диагностирования V от относительной среднеквадратической погрешности измерения амплитудных частотных характеристик σ_A при поиске одиночных параметрических дефектов и контроле всех прямых показателей ДМ на множестве контрольных точек Z_3

Параметром семейства графиков является величина относительного отклонения δ прямого показателя ДМ от номинала (степень дефекта). Значительные отклонения прямых показателей ($\delta = 0.4$) при погрешностях $\sigma_A = 0.01-0.03$ обуславливают меньшие значения D , чем для случаев $\delta=0.2$ и $\delta = 0.3$, что можно объяснить применением функций чувствительности только первого порядка при поиске дефектов.

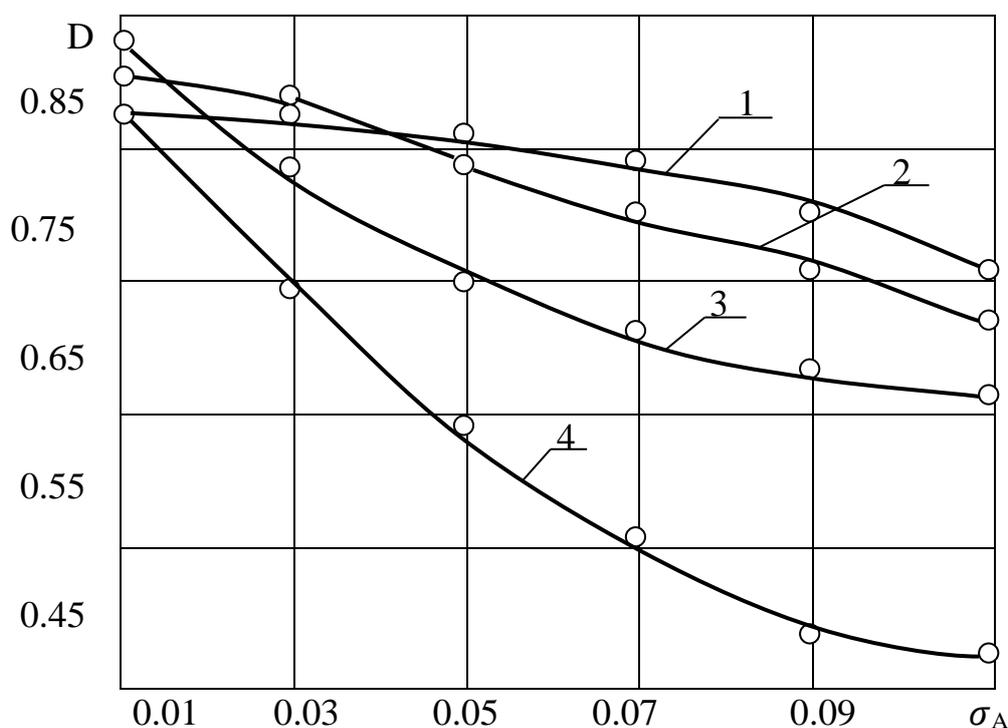


Рис.5.5. Влияние погрешностей измерения частотных характеристик на достоверность диагностирования D при поиске одиночных параметрических дефектов в ОД № 2 для различных относительных отклонений параметров: 1 - $\sigma = 0.4$; 2 - $\sigma = 0.3$; 3 - $\sigma = 0.2$; 4 - $\sigma = 0.1$

При малых значениях σ_A достоверность диагностирования принимает значения меньше единицы, поскольку в объекте имеет место пара неразличимых параметрических дефектов в ДЭ № 8 и № 7.

Оценка достоверности диагностирования вычислялась по формуле

$$D = \sum_{i=1}^M \hat{P}_{ii} \quad (5.1)$$

где \hat{P}_{ii} - оценка вероятности правильного определения i - го технического состояния (i - го одиночного дефекта) ОД; M - число возможных технических состояний.

Величину \hat{P}_{ii} при условии, что средства диагностирования могут находиться только в исправном состоянии, вычисляют по формуле

$$\hat{P}_{ii} = P_i^0 \frac{r_{ii}}{N_i}, \quad (5.2)$$

где P_i^0 - априорная вероятность нахождения ОД в состоянии i ;

r_{ii} - число испытаний в состоянии i , при которых зафиксировано состояние i ; N_i -общее число испытаний для состояния i .

При определении оценок достоверности диагностирования D везде далее все дефекты считались равновероятными, то есть $P_i^0 = 1/M$, $\forall i = 1, M$ и для вычислений использовалась формула

$$D = \sum_{i=1}^M \frac{r_{ii}}{N_i M}. \quad (5.3)$$

На рис.5.6 показана зависимость $D=f(\sigma_A)$ для случая поиска одиночных структурных дефектов без учета и с учетом КЭД (из числа контролируемых, удалены ДЭ № 8 я № 9, как входящие в классы эквивалентных дефектов).

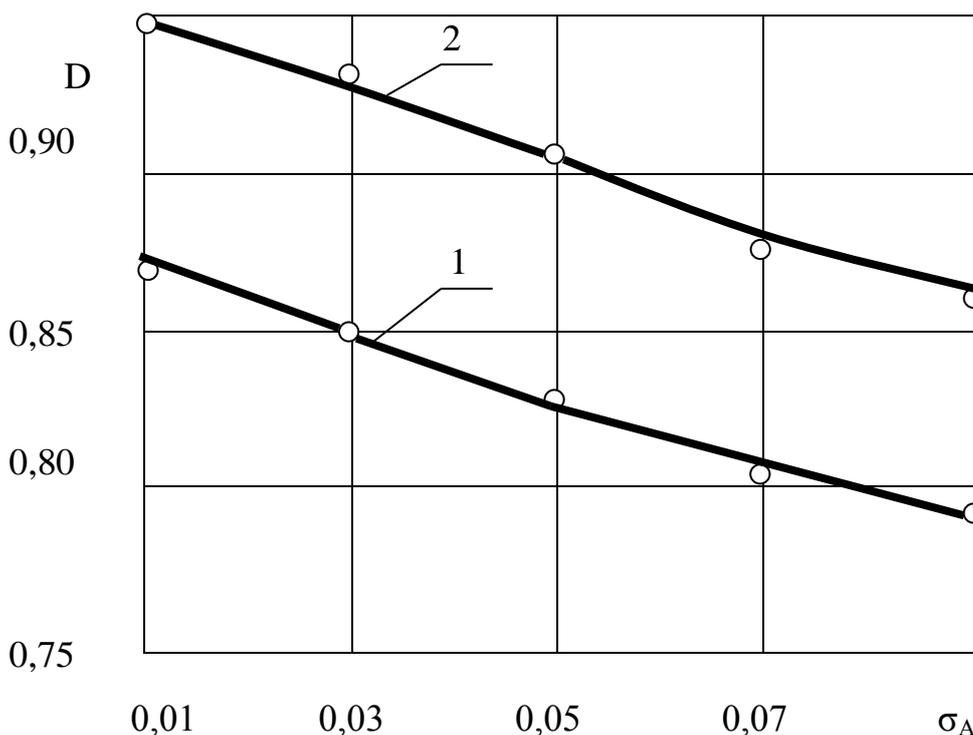


Рис.5.6. Влияние погрешностей измерения частотных характеристик на достоверность диагностирования при поиске одиночных структурных дефектов в ОД № 2:1-без учета КЭД; 2-с учетом КЭД

Из графиков видно, что при значительных погрешностях измерений ($\sigma_A=0,08-0,09$) полученные оценки достоверности D не хуже, чем для

алгоритма поиска параметрических дефектов. Поэтому в условиях наличия погрешностей измерения частотных характеристик предпочтительнее использование алгоритма поиска структурных дефектов, поскольку при его реализации производится меньший объем вычислений.

Для оценки влияния степени неадекватности используемой ДМ на достоверность диагностирования было проведено статистическое моделирование процессов поиска дефектов в условиях изменения номинальных значений параметров передаточных функций ДЭ по нормальному закону с заданным средним и дисперсией, то есть моделировалось наличие относительной среднеквадратической

погрешности σ_M задания параметров структурной схемы. Полученные зависимости $D=f(\sigma_A)$ при $\sigma_A = 0.03$, $\delta = 0.4$ для множеств Z_2 и Z_3 контрольных точек приведены на рис.6.8.

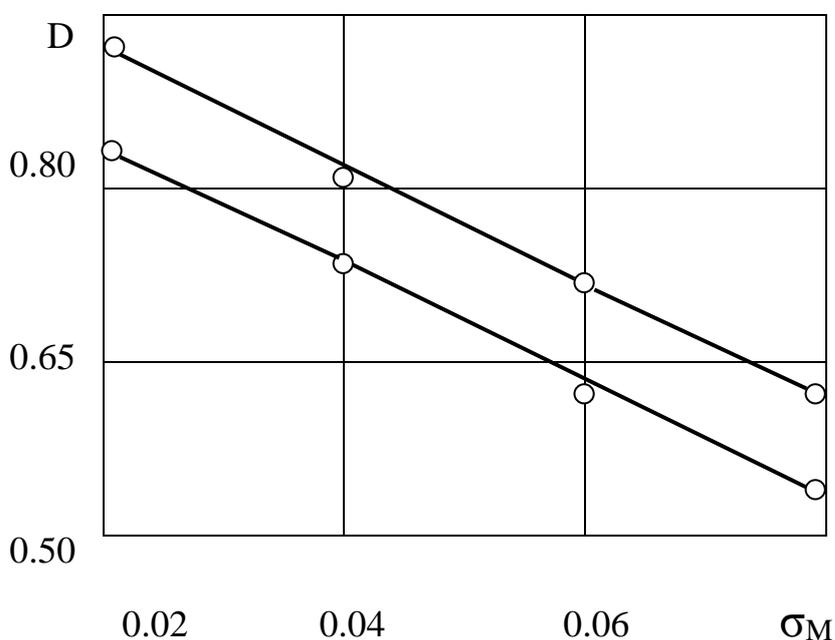


Рис.5.7. Влияние неадекватности ДМ на величину достоверности диагностирования при поиске параметрических дефектов в ОД № 2:1 — с использованием множества контрольных точек Z_3 ; 2 - с использованием множества контрольных точек Z_2

Были определены доверительные интервалы для оценок D , которые, как известно, асимптотически нормально распределены со средним

$m=D$ и дисперсией $\sigma^2=D(1-D)/n$, где $n = \sum_{i=1}^M N_i$. Поскольку при проведении экспериментов было принято $N_i=10, \forall_i, i=1, M$, поэтому $n=260$.

Границы доверительного интервала P_1, P_2 определялись из уравнения

$$P^2 \left(1 + \frac{x_a^2}{n}\right) - p \left(2D + \frac{x_a^2}{n}\right) + D^2 = 0 \quad (5.4)$$

где x_a определяется для доверительной вероятности α из уравнения

$$2\Phi(x_a) = \alpha, \quad (5.5)$$

в котором

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$$

Для доверительной вероятности $\alpha = 0.9$, используя уравнение (5.5) было найдено $x_a = 1.65$.

Для оценки $D=0.8$ в результате решения уравнения (5.4) были получены границы доверительного интервала $P_1=0.766, P_2=0.836$. В результате аналогичных вычислений для значения оценки $D=0.9$ были получены $P_1=0.866, P_2=0.926$. Поскольку объем выборки при проведении статистического моделирования был одним и тем же для всех полученных зависимостей, то проведенные вычисления дают доверительные оценки для всех этих зависимостей.

На рис.5.8 представлена структурная схема ОД № 3, представляющего собой систему стабилизации с ПИ-регулятором.

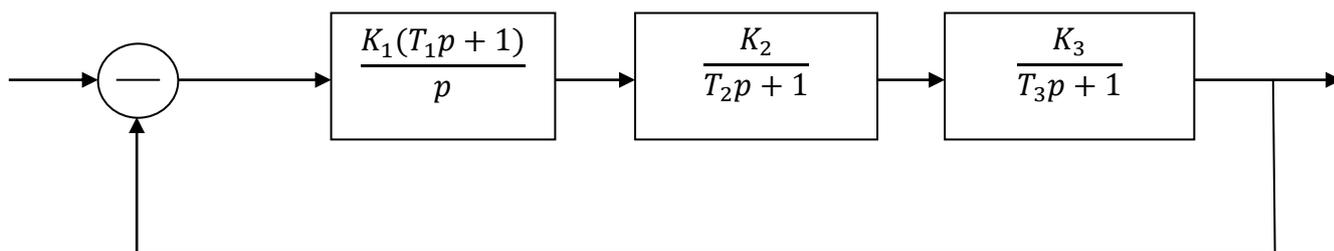


Рис.5.8. Структурная схема ОД № 3

Номинальные значения параметров передаточной функции:

$$K_1 = K_2 = K_3; T_1 = 4 \text{ с}; T_2 = 0.5 \text{ с}; T_3 = 4 \text{ с}.$$

Для исследования свойств диагностической модели ОД № 3 было проведено имитационное моделирование процессов поиска одиночных структурных и параметрических дефектов в условиях наличия погрешностей снятия частотных характеристик и неадекватности диагностической модели. Поиск дефектов осуществлялся в диапазоне контролируемых частот $\Delta\omega_k = 1 - 10\text{с}^{-1}$ взятых с шагом $\Delta\omega = 0.1 \text{ с}^{-1}$ для множества контрольных точек $Z = \{1, 2, 3\}$.

На рис.5.9 представлены зависимости достоверности диагностирования от величины погрешностей измерения частотных характеристик при использовании различных функций чувствительности и алгоритмов поиска дефектов. Моделирование осуществлялось по всему множеству возможных одиночных параметрических или структурных дефектов путем реализации относительного отклонения параметров при моделировании дефектов $\delta = 0,4$.

На рис.5.9 показаны следующие зависимости:

- 1 - для алгоритма поиска структурных дефектов и относительных функций чувствительности;
- 2 - для алгоритма поиска параметрических дефектов и относительных функций чувствительности;
- 3 - для алгоритма поиска параметрических дефектов и абсолютных функций чувствительности:

4 - для алгоритма поиска структурных дефектов и абсолютных функций чувствительности.

Анализ полученных зависимостей показывает, что для повышения достоверности диагностирования следует использовать относительные функции чувствительности. Алгоритм поиска структурных дефектов обеспечивает лучшую помехоустойчивость, чем алгоритм поиска параметрических дефектов при использовании относительных функций чувствительности.

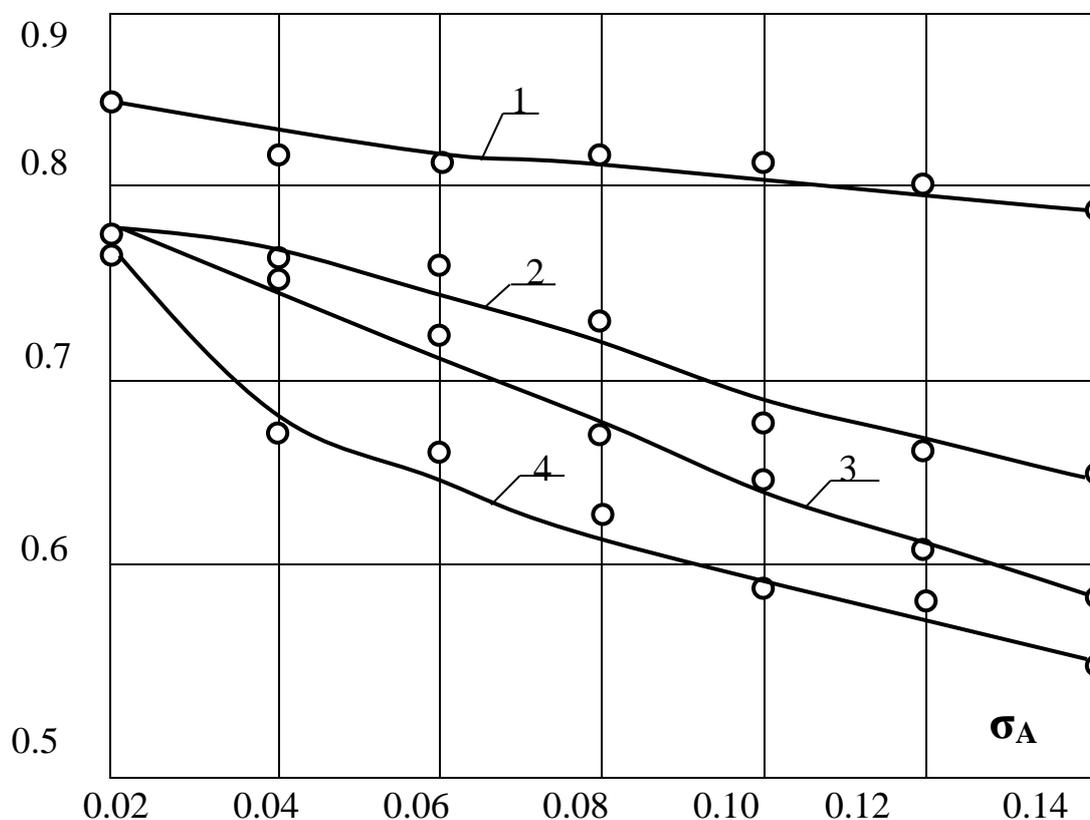


Рис.5.9. Влияние уровня погрешности измерения амплитудных частотных характеристик σ_A на достоверность диагностирования D при поиске одиночных дефектов в ОД № 3

На рис.5.10 показаны зависимости достоверности диагностирования одиночного дефекта в ДЭ №2 (изменение постоянной времени T_2

исполнительного устройства) от уровня неадекватности диагностической модели σ_M :

- 1, 3 - для алгоритма поиска структурного дефекта;
- 2,4 - для алгоритма поиска параметрического дефекта;
- 1,2 -при $\Delta T_2 = 100\%$;
- 3,4-при $\Delta T_2 = 20\%$.

Поиск дефекта проводился с использованием относительных функций чувствительности с использованием частот в диапазоне $\Delta\omega_k = 1 - 10c^{-1}$, взятых с шагом $\Delta\omega = 0.1c^{-1}$ при фиксированном уровне погрешности определения частотных характеристик $\sigma_A = 0.05$.

Как видно из полученных зависимостей робастность алгоритма поиска структурных дефектов выше, чем у алгоритмов поиска параметрических дефектов.

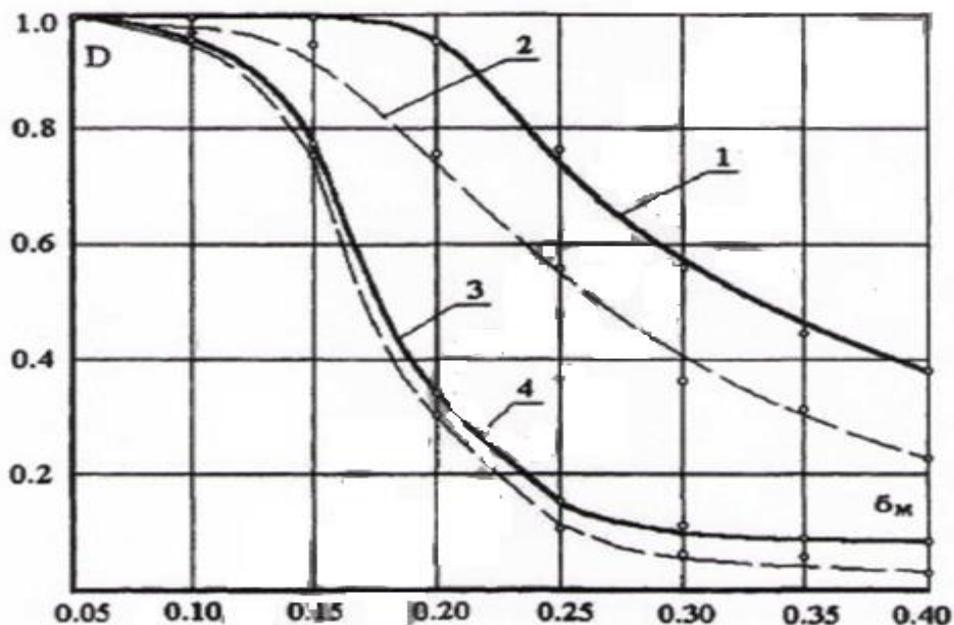


Рис. 5.10. Влияние неадекватности диагностической модели σ_M на достоверность диагностирования D при поиске одиночного дефекта в блоке 2 ОД №3 по амплитудным частотным характеристикам

При статистическом моделировании ОД № 3 использовался объем выборки для каждого дефекта $N_i=100$, $\forall i$, $i = \overline{1, M}$. Поскольку для рассматриваемого ОД $M=3$ для случая применения алгоритма поиска структурного дефекта и $M=6$ в случае применения алгоритма поиска параметрического дефекта, то результирующий объем выборки в обоих случаях не меньше, чем при моделировании ОД № 2. Поэтому доверительные интервалы полученных оценок достоверности диагностирования D будут не шире, чем рассчитанные ранее.

Из приведенных на рис.5.10 зависимостей следует, что эффективность применения модели чувствительности первого порядка не снижается (а даже увеличивается) при росте степени отклонения параметров от номинальных в дефектных ДЭ. Это же положительное свойство структурных алгоритмов диагностирования иллюстрируют графики, приведенные на рис.5.11, где показана зависимость апостериорной различимости одиночных структурных дефектов от относительного отклонения параметров от номинальных значений при их поиске по амплитудным частотным характеристикам с использованием относительных функций чувствительности.

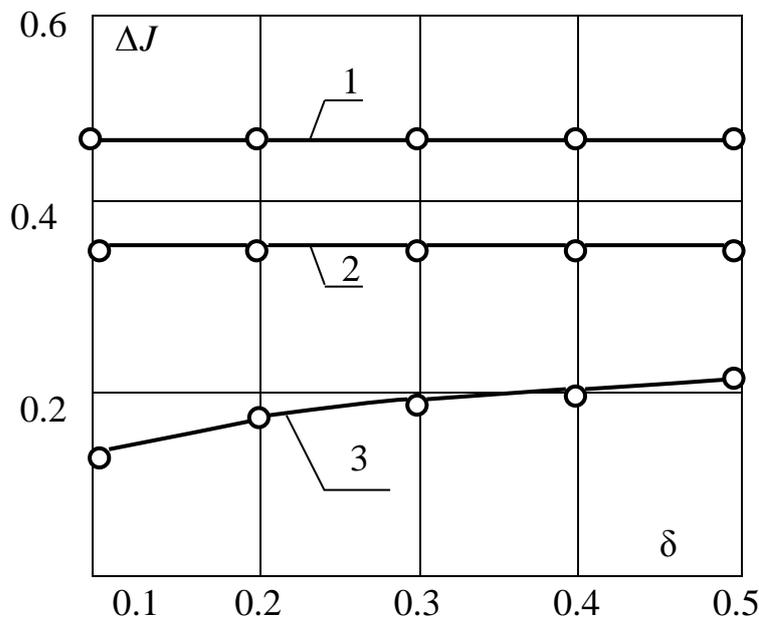


Рис.5.11. Зависимость апостериорной различимости структурных дефектов в ОД М 3 от относительного отклонения параметров δ

График 1 получен для различимости дефекта в ДЭ № 3, график 2 - для ДЭ № 1, график 3 - для ДЭ № 2. По оси абсцисс отложено относительное отклонение постоянных времени соответствующих блоков.

На рис.5.12 приведена структурная схема ОД № 4, являющаяся моделью системы стабилизации давления газа на установке ПВ-1 (прямотрубной печи для подогрева нефтепродуктов) нефтеперерабатывающего завода.

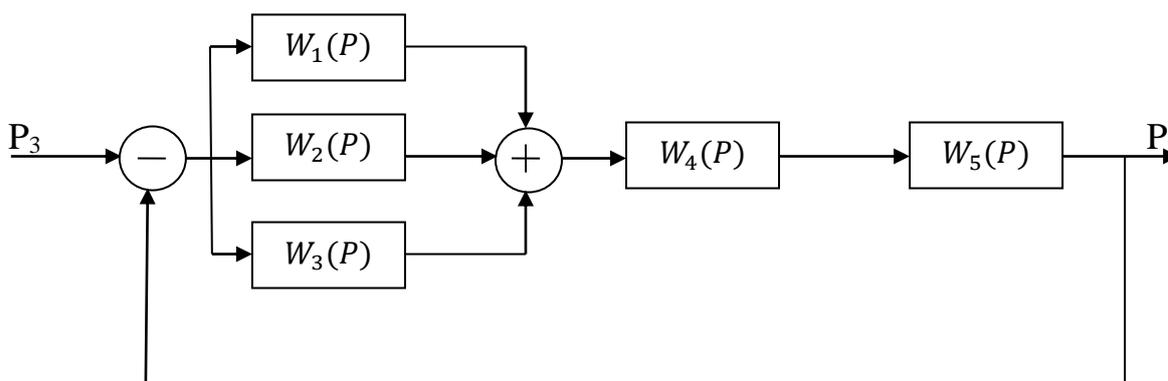


Рис. 5.12. Структурная схема ОД №4

Передаточные функции ДЭ входящих в объект диагностирования имеют следующий вид:

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 * p + 1}; \quad W_2(p) = \frac{k_2}{p * (T_2 * p + 1)}; \quad W_3(p) = \frac{k_3 * p}{T_3 * p + 1};$$

$$W_4(p) = e^{-p\tau}; \quad W_5(p) = \frac{k_5}{T_5 * p + 1};$$

В системе реализован ПИД закон регулирования (ДЭ №№ 1-3). Исполнительное устройство, представляющее собой электрический вентиль, объект регулирования (зона трубопровода между вентилем и датчиком) и датчик давления представлены в модели динамическими элементами № 4 и № 5. Параметры коэффициентов усиления в относительных единицах и

постоянных времени: $K_1=4,5$; $K_2=4$; $K_3=0,5$; $\tau=0.1$ с; $K_5=1$; $T_1=T_2=T_3=0,1$ с; $T_5=1$ с.

Объект диагностирования имеет полосу пропускания $\Delta\omega_n = 8$ с⁻¹, диапазон существенных частот (на уровне 0.1) $\Delta\omega_{cu} = 40$ с⁻¹. Поэтому наибольшие значения априорных коэффициентов различимости получены при использовании диапазона контролируемых частот $\Delta\omega_k = 0-40$ с⁻¹.

Все контрольные точки, которые практически возможно организовать в объекте, определяются множеством $Z = \{1,2,3,5\}$. Применение алгоритма поиска одиночного структурного дефекта в ДЭ № 5 (изменение технического состояния вентиля, регулирующего подачу газа, в виде изменения постоянной времени $T_2=2$ с) на множестве контрольных точек Z с использованием относительных функций чувствительности амплитудных частотных характеристик и десяти отсчетов частотных

характеристик взятых в указанном диапазоне $\Delta\omega = 4$ с⁻¹ дает следующие значения нормированных диагностических признаков:

$$J_5=0.00167; J_4=0.00167; J_3=0.570; J_1=0.832; J_2=0.949.$$

Четвертый и пятый ДЭ составляют класс эквивалентных дефектов как имеющие эквивалентное положение в ДМ. Поскольку технически на выходе ДЭ №4 организовать контрольную точку нельзя, будем считать этот КЭД неустранимым. Поставим задачу минимизации числа контрольных точек при сохранении различимости дефектов в ДЭ 1,2,3,5 (или 4). На рис.6.14 приведены результаты анализа различимости одиночных структурных дефектов при использовании множества контрольных точек $Z_1 = \{1,5\}$.

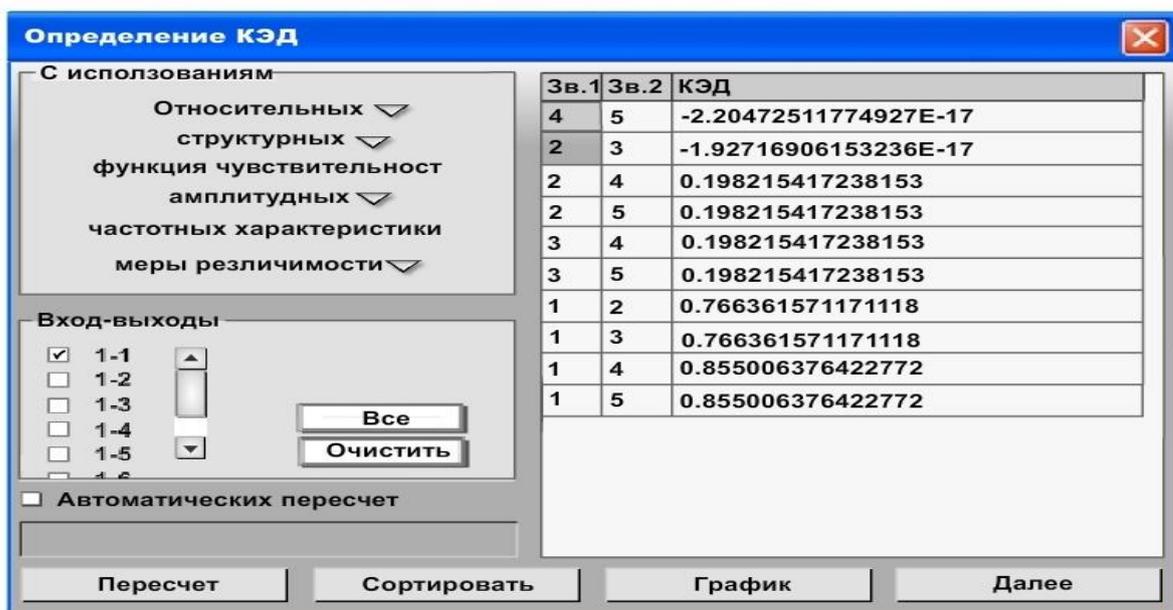


Рис.5.13. Априорные коэффициенты различимости структурных дефектов ОД № 4 для множества контрольных точек Z_1

Как видно из таблицы, на множестве Z_1 контрольных точек имеет место две пары эквивалентных дефектов. На рис 5.14 приведены результаты анализа различимости одиночных структурных дефектов при использовании множества контрольных точек $Z_2 = \{3,5\}$. В этом случае различимость дефектов такая же, как и для множества контрольных точек Z .

Применение алгоритма поиска одиночного структурного дефекта в ДЭ № 5 ($T_2=2$ с) на множестве контрольных точек Z_2 с использованием относительных функций чувствительности амплитудных частотных характеристик и десяти отсчетов частотных характеристик взятых в указанном диапазоне с шагом $\Delta\omega=4\text{с}^{-1}$ даёт следующие значения нормированных диагностических признаков:

$$J_5=0.00108; J_4=0.00108; J_2=0.0202; J_1=0.236; J_3=0.486.$$

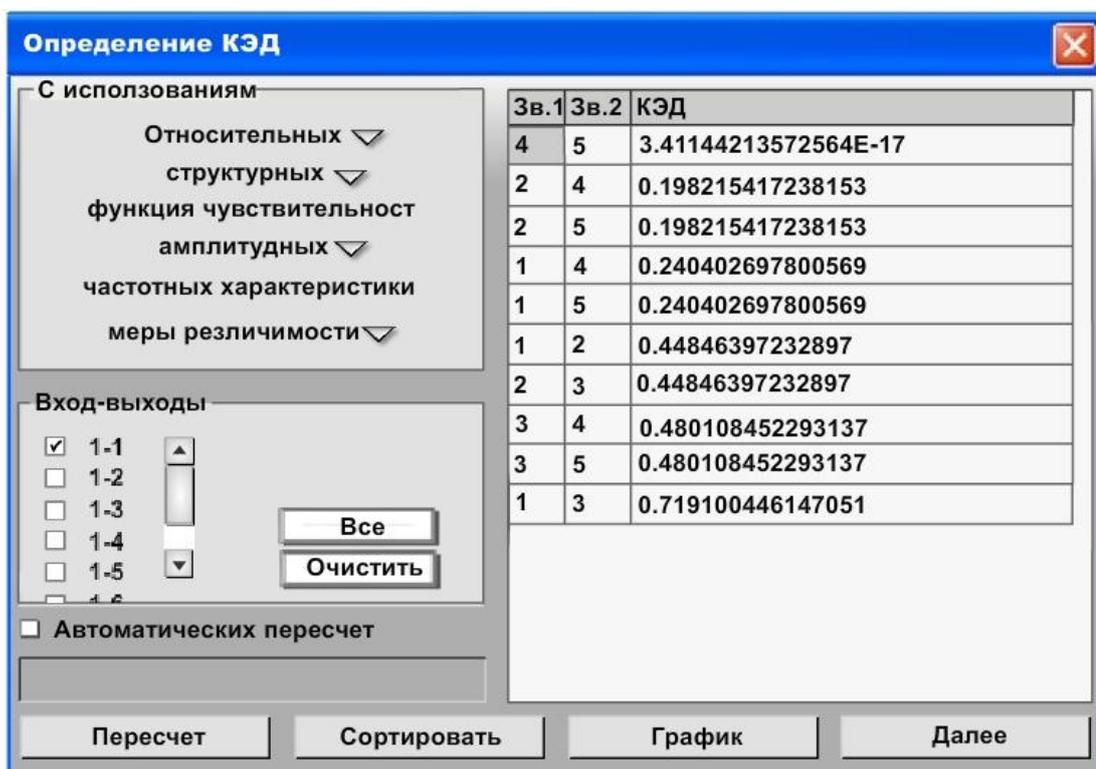


Рис.5.14. Априорные коэффициенты различимости структурных дефектов ОД № 4 для множества контрольных точек Z_2

Применение алгоритма поиска одиночного структурного дефекта в ДЭ № 2 ($K_2=2$) при тех же условиях диагностирования даёт значения диагностических признаков, показанные на рис. 5.15.

Для ОД №4 было проведено исследование влияния уровня погрешностей измерения амплитудных частотных характеристик на оценку вероятности правильного обнаружения дефекта в ДЭ №2 при использовании множества контрольных точек Z_2 , относительных функций чувствительности и указанного ранее частотного диапазона. Результаты моделирования для различных отклонений коэффициента K_2 приведены на рис.5.16.

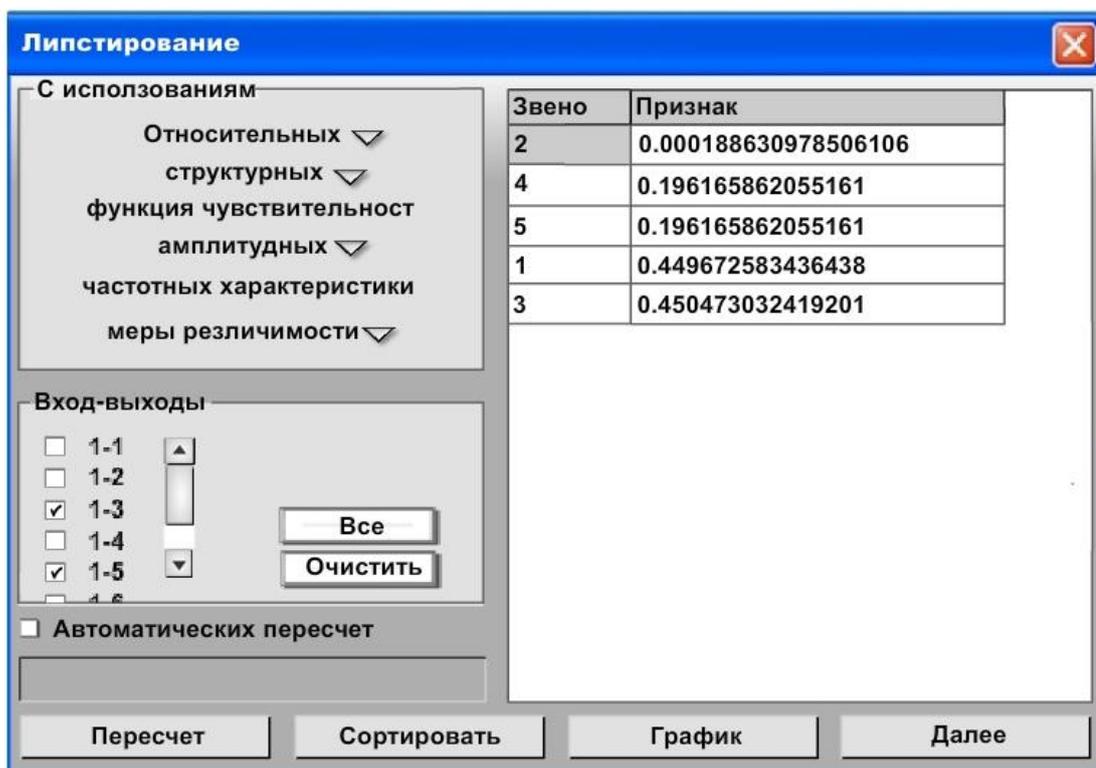


Рис.5.15. Результаты поиска в ДЭ № 2 с использованием множества контрольных точек Z_2

Как и для объектов диагностирования №2 и №3, алгоритм поиска структурных дефектов при значительных проявлениях дефектов (отклонение от номинальных значений более 12%) обладает лучшей помехоустойчивостью, чем алгоритм поиска параметрических дефектов.

Результаты исследования зависимости достоверности диагностирования фиксированного дефекта от величины априорного коэффициента его различимости представлены на рис.5.17.

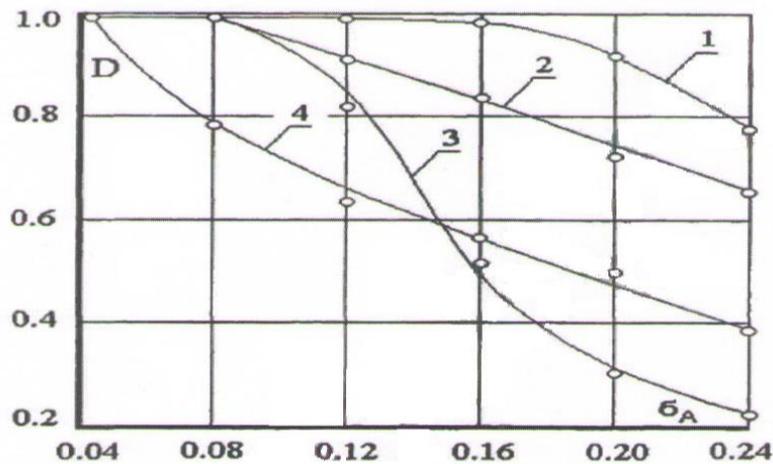


Рис.5.16. Влияние уровня погрешностей измерения амплитудных частотных характеристик σ_A на достоверность диагностирования D при поиске ночного дефекта K_2 в ОД № 4:

- 1 - для алгоритма поиска структурного дефекта и $\Delta K_2=25\%$;
- 2 - для алгоритма поиска параметрического дефекта и $\Delta K_2=25\%$;
- 3 - для алгоритма поиска структурного дефекта и $\Delta K_2=12\%$;
- 4 - для алгоритма поиска параметрического дефекта и $\Delta K_2=12\%$.

В объект диагностирования был введен дефект в виде отклонения K_2 на величину 12.5% от номинала. Производилось статистическое моделирование процессов поиска дефектов по амплитудным частотным характеристикам с использованием относительных функций структурной чувствительности в условиях различных уровней погрешностей измерения частотных характеристик для трех случаев:

1 - использовалось множество контрольных точек $Z-\{1,2,3,5\}$ и частоты в диапазоне $\Delta\omega_k=1 \div 30 \text{ с}^{-1}$ с шагом $\Delta\omega=2\text{с}^{-1}$, что обеспечивало минимальное значение априорного коэффициента различимости $\varphi_{2\min} = 0.938$;

2- использовалось множество контрольных точек $Z_3=\{2,5\}$ и частоты в диапазоне $\Delta\omega_k=0 \div 40 \text{ с}^{-1}$ с шагом $\Delta\omega = 4\text{с}^{-1}$, что обеспечивало минимальное значение априорного коэффициента различимости $\varphi_{2\min} = 0.725$;

3 - использовалось множество контрольных точек $Z_3 = \{2.5\}$ и частоты в диапазоне $\omega = 0 \div 4 \text{ с}^{-1}$ с шагом $\Delta\omega = 0.4 \text{ с}^{-1}$, что обеспечивало минимальное значение априорного коэффициента различимости $\varphi_{2\min} = 0.213$.

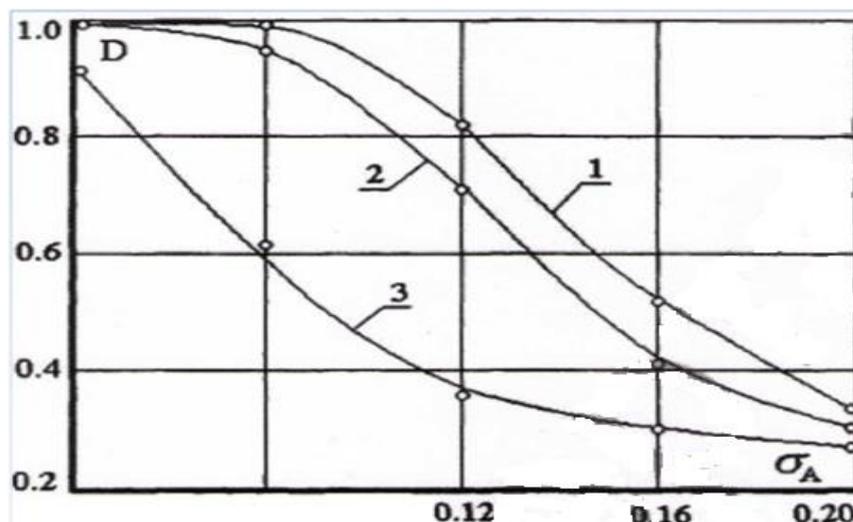


Рис.5.17. Зависимость достоверности диагностирования D при поиске одиночного дефекта K_2 в ОД №4 от уровня погрешностей измерения частотных характеристик для различных априорных коэффициентов различимости дефекта: 1- $\varphi_{2\min} = 0.938$; 2- $\varphi_{2\min} = 0.725$; 3- $\varphi_{2\min} = 0.213$

Для этих трех случаев получены три зависимости $D = f(\sigma_A)$, анализ которых показывает, что достоверность диагностирования прямо пропорциональна величине минимального априорного коэффициента различимости одиночного дефекта. Предварительное получение и анализ зависимостей, подобных приведенным на рис.6.18, для фиксированных дефектов или всего множества дефектов ОД позволяет оценить ожидаемый уровень достоверности диагностирования по величине априорных коэффициентов различимости, выбрать оптимальные условия поиска дефектов.

5.2. Результаты исследования алгоритмов диагностирования во временной области.

Для исследования методов диагностирования во временной области рассмотрим структурную схему нелинейного ОД № 5, приведенную на рис.5.18.

Объект диагностирования представляет собой САР частоты вращения двигателя постоянного тока. Система построена по принципу подчиненного регулирования с ПИ - регулятором тока (W_3) и

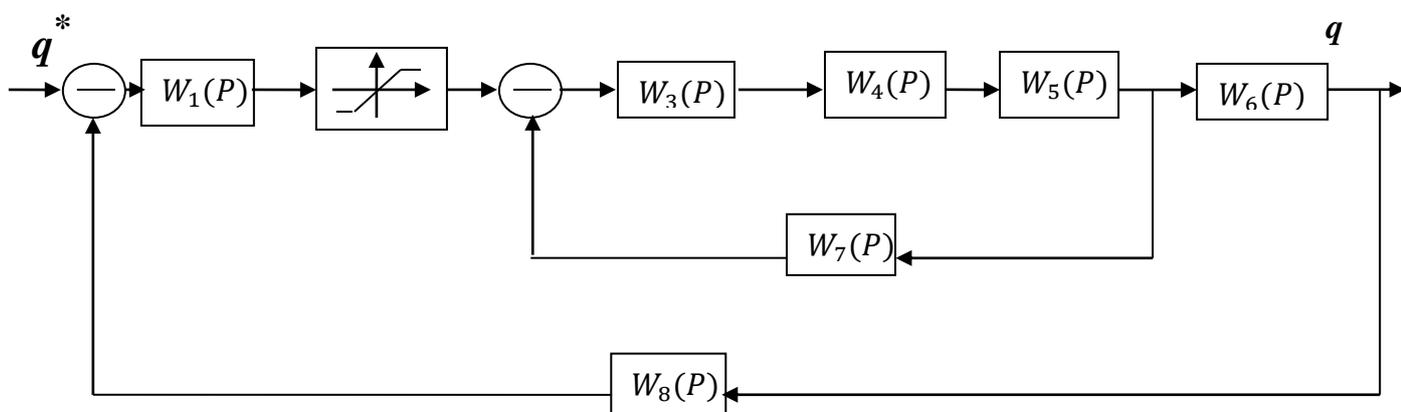


Рис. 5.18. Структурная схема ОД № 5

Передаточные функции ОД имеют вид:

$$W_1(p) = \frac{K_1(1+T_1p)}{p}; \quad W_3(p) = \frac{K_3(1+T_3p)}{p};$$

$$W_4(p) = \frac{K_4}{T_4p+1}; \quad W_5(p) = \frac{K_5}{T_5p+1};$$

$$W_6(p) = \frac{K_6}{p}; \quad W_7(p) = K_7; \quad W_8(p) = K_8;$$

Номинальные значения параметров:

$K_1=2,242 \text{ с}^{-1}$, $T_1=8\text{с}$; $K_3=0,113\text{с}^{-1}$, $T_3=6,377 \text{ с}$; $K_4=110$,
 $T_4=1\text{с}$; $K_5=40$, $T_5=6,77 \text{ с}$; $K_6=0,0001943\text{с}^{-1}$, $K_7=0,001$,
 $K_8=0,0718$,

Уровень ограничения нелинейного элемента 12,375.

Рассмотрим результаты применения для диагностирования этого объекта двух алгоритмов:

1) алгоритма поиска одиночных дефектов с использованием модели чувствительности $U(t)$ временных характеристик;

2) алгоритма поиска одиночных дефектов с использованием оценок изображений по Лапласу сигналов и модели чувствительности $U(\alpha)$.

Исследования проводились на интервале времени от 0 до 10 с шагом расчета 0,01 с. при использовании контрольных точек после каждого звена и абсолютных функций чувствительности. В качестве входного сигнала использовался псевдослучайный двухполярный сигнал с формирующим фильтром, амплитудой $A=4$, периодом следования тактовых импульсов $T_u=0,1$ с. и числом разрядов $m=7$. Дефект заключался в изменении $K_3 = 0,2 \text{ с}^{-1}$.

На рис,5.19 показаны реакцию модели и объекта на псевдослучайный входной сигнал, полученные на выходе шестого динамического элемента, а на рис, 5,20 - сигналы на выходе третьего динамического элемента.

Форма выходных сигналов третьего динамического элемента показывает, что объект диагностирования работает в режиме существенных ограничений сигналов в блоке № 2, то есть в нелинейном режиме.

В процессе диагностирования для различных алгоритмов поиска структурных дефектов были получены следующие значения нормированных диагностических признаков.

Диагностирование без адаптации с использованием модели чувствительности $U(t)$:

$$J_1^* = 0,19; \quad J_2^* = 0,16; \quad J_3^* = 0,01; \quad J_4^* = 0,27;$$
$$J_5^* = 0,24; \quad J_6^* = 0,43; \quad J_7^* = 0,25; \quad J_8^* = 0,27;$$

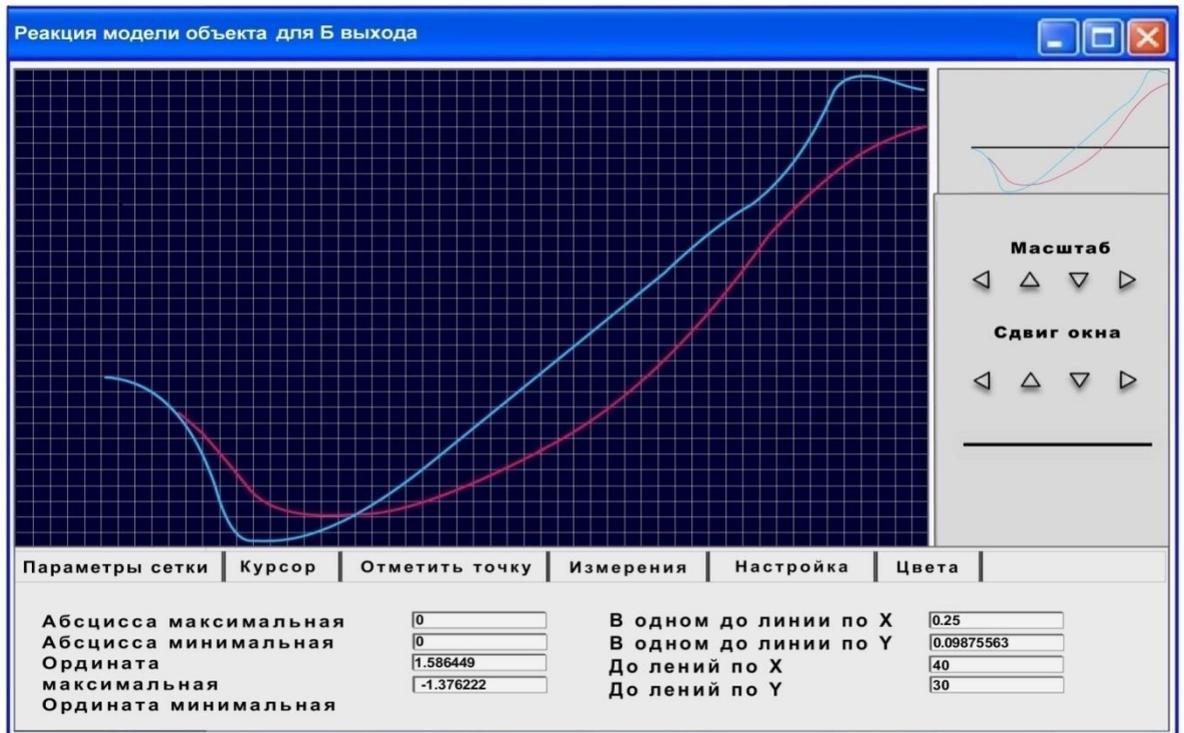


Рис. 5.19. Реакция модели и объекта на выходе шестого ДЭ

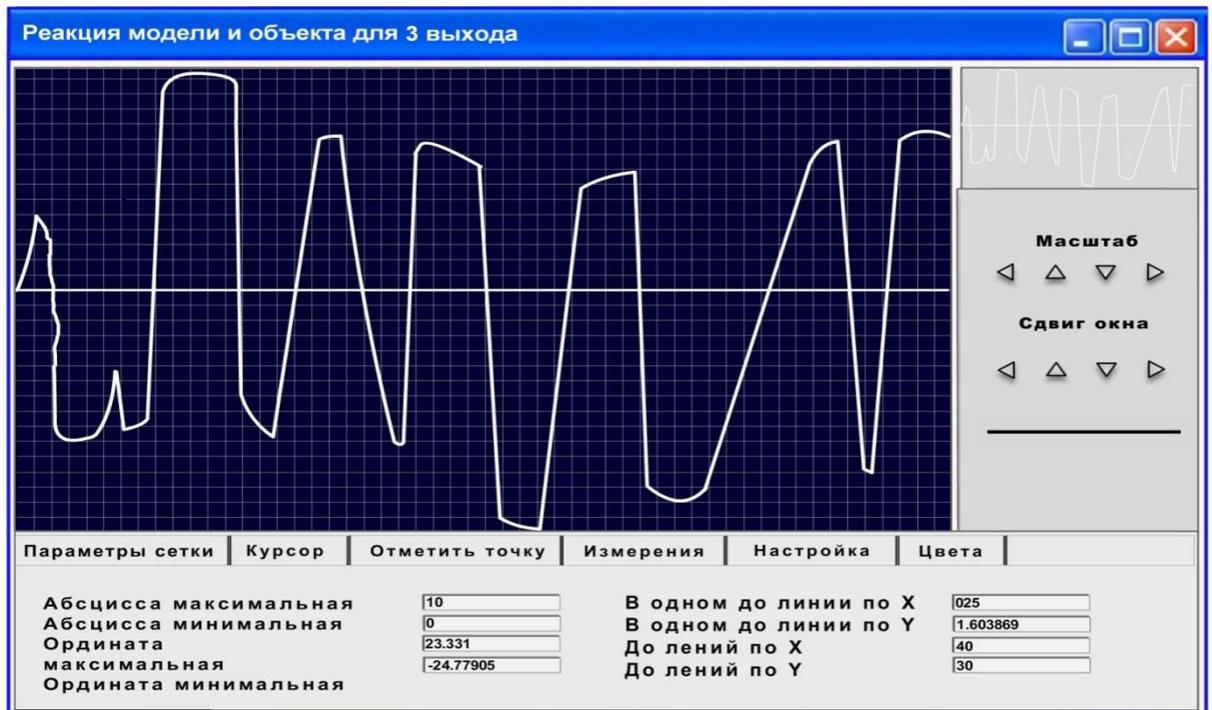


Рис. 5.20. Реакция модели и объекта на выходе третьего ДЭ

Апостериорные коэффициенты различимости третьего дефекта имеют значения:

$$\Delta J_{31}^* = 0,18; \quad \Delta J_{32}^* = 0,15; \quad \Delta J_{34}^* = 0,26;$$
$$\Delta J_{35}^* = 0,23; \quad \Delta J_{36}^* = 0,42; \quad \Delta J_{37}^* = 0,24; \quad \Delta J_{38}^* = 0,26.$$

Диагностирование с адаптацией по мере различимости дефекте уровнем адаптации 0,2 дает следующие значения признаков дефектов

$$J_1^* = 0,74; \quad J_2^* = 0,50; \quad J_3^* = 0; \quad J_4^* = 0,28;$$
$$J_5^* = 0,99; \quad J_6^* = 0,98; \quad J_7^* = 0,92; \quad J_8^* = 0,98.$$

В этом случае апостериорные коэффициенты различимости имеют значения:

$$\Delta J_{31}^* = 0,74; \quad \Delta J_{32}^* = 0,50; \quad \Delta J_{34}^* = 0,28;$$
$$\Delta J_{35}^* = 0,99; \quad \Delta J_{36}^* = 0,98; \quad \Delta J_{37}^* = 0,92; \quad \Delta J_{38}^* = 0,98.$$

Диагностирование с применением алгоритмов адаптации позволило увеличить значения апостериорных коэффициентов различимости дефектов и, тем самым, повысить помехозащищенность алгоритмов диагностирования

Диагностирование применением модели относительной чувствительности и преобразований Лапласа реакций объекта и модели для параметра преобразования =0.5:

$$J_1^* = 0,46; \quad J_2^* = 0,41; \quad J_3^* = 0,00068; \quad J_4^* = 0,13;$$
$$J_5^* = 0,99; \quad J_6^* = 0,97; \quad J_7^* = 0,13; \quad J_8^* = 0,22.$$

Во всех трех случаях значения диагностических признаков правильно показывают, что дефект находится в третьем звене.

На рис.5.21 приведены графики, показывающие зависимость оценки вероятности правильного обнаружения дефекта в ДЭ №3 от среднеквадратической погрешности задания параметров ДМ σ_M при использовании алгоритма поиска структурного дефекта и относительных функций чувствительности (график 1), при использовании алгоритма поиска структурного дефекта и абсолютных функций чувствительности (график 2),

при использовании алгоритма поиска параметрического дефекта и относительных функций чувствительности (график 3).

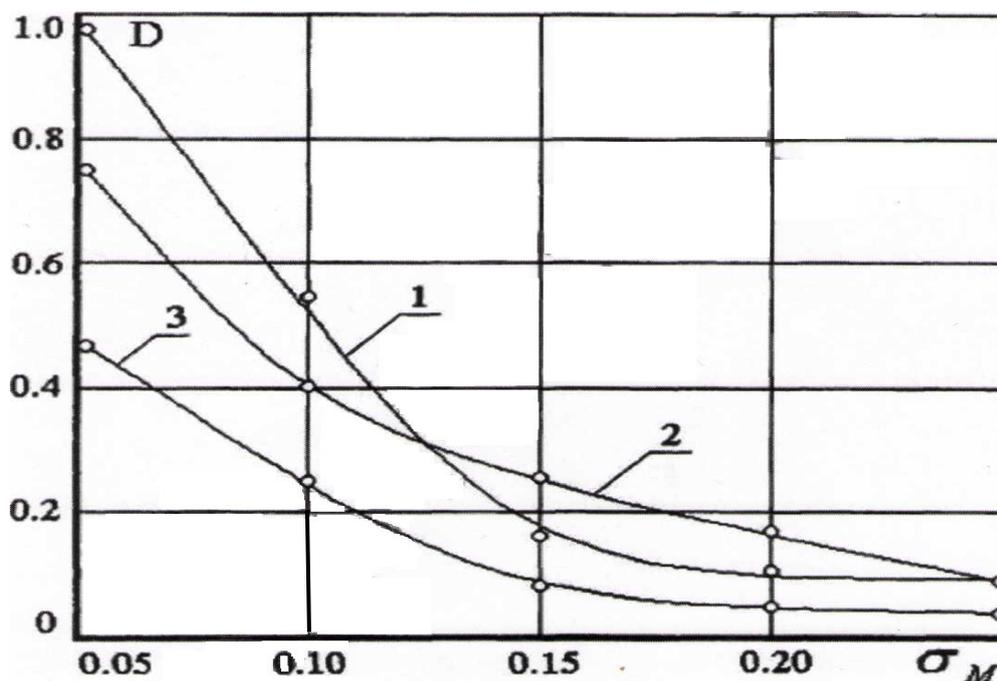


Рис.5.21. Зависимость достоверности диагностирования в ОД № 5 от уровня неадекватности диагностической модели σ_M при использовании алгоритма поиска структурных дефектов (1,2) и алгоритма поиска параметрических дефектов (3)

При моделировании использовался входной сигнал и множество контрольных точек, описанные выше.

Как видно из полученных зависимостей, наилучшие результаты при диагностировании нелинейного ОД дает применение алгоритма поиска структурного дефекта с использованием относительных функций чувствительности. Следует отметить, что применение алгоритма поиска параметрических дефектов с использованием абсолютных функций чувствительности в этом случае привело к ошибкам диагноза при любых уровнях неадекватности ДМ σ_M .

Однако применение относительных функций чувствительности связано с делением сигналов модели чувствительности на выходные сигналы ДМ. При

знакопеременных выходных сигналах могут появляться ошибки, связанные с делением на малые числа.

На рис.5.22 показаны результаты применения при диагностировании нелинейного ОД №5 алгоритмов адаптации по величине квадрата нормы отклонений ОД от реакций ДМ $H(t)$ и величине наименьших текущих значений априорных коэффициентов различимости $G(t)$ по всему множеству дефектов.

При проведении этого эксперимента в ОД был введен дефект в блок № 1 (изменение коэффициента усиления на 50%). При диагностировании использовались абсолютные функции чувствительности и входной сигнал ПСДП с формирующим фильтром и характеристиками, описанными выше.

Верхний уровень адаптации по норме отклонения определялся исходя из предварительного анализа сигналов объекта и модели и был выбран равным $H_{max}=10000$. Нижний уровень адаптации по норме был принят равным нулю. Без применения режимов адаптации апостериорный коэффициент различимости дефекта в ДЭ№1 был равен $\Delta J=0.07$. Применение алгоритмов адаптации позволяет повысить апостериорную различимость дефектов, однако требует предварительного анализа свойств модели чувствительности. Так, необоснованно завышенный порог адаптации по степени различимости дефектов может привести к обнулению всех диагностических признаков. Поскольку анализ различимости дефектов в ОД проводится во временной области для конкретного входного сигнала» то оценка оптимального уровня адаптации затруднена при рабочем диагностировании.

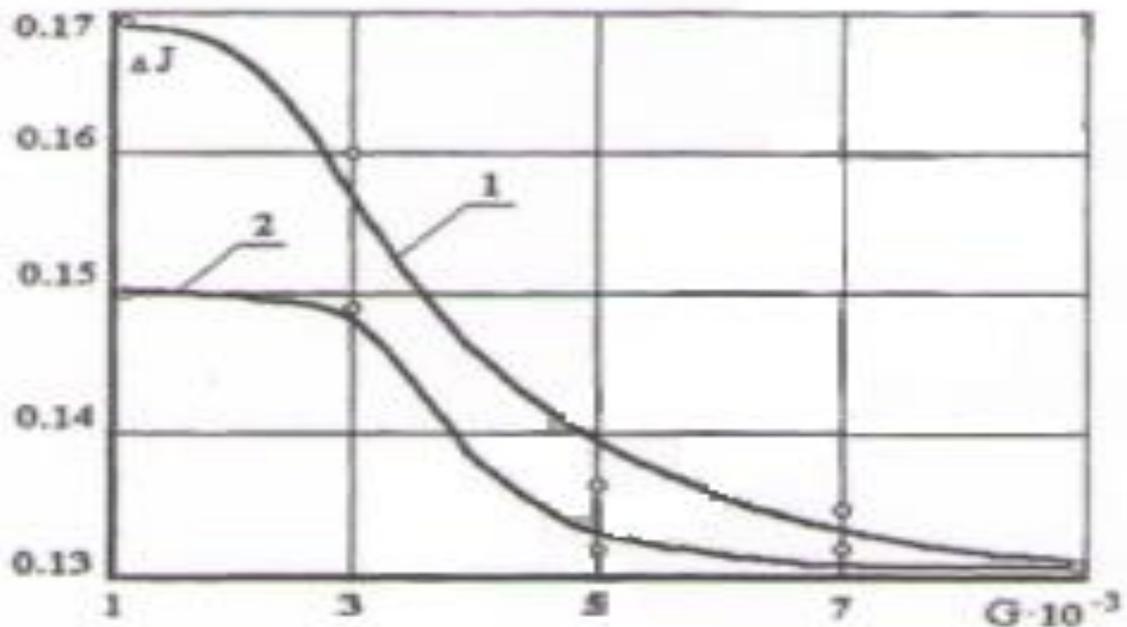


Рис.5.22. Влияние уровня адаптации G по степени априорной различимости структурных дефектов на величину апостериорной различимости ΔJ в ОД №5 при использовании адаптации по норме отклонения реакций ОД (1) и без использования адаптации по норме отклонения (2)

Степень различимости дефектов зависит от согласованности характеристик входного сигнала с динамическими характеристиками ОД. Это обстоятельство хорошо иллюстрируют результаты численных экспериментов с диагностической моделью ОД № 1. На рис.5.23 приведены зависимости коэффициентов апостериорной различимости дефектов в динамических элементах №2 (сплошной график 1) и № 4 (график 2) объекта диагностирования № 1 от частоты среза формирующего фильтра генератора ПСДП, выходной сигнал которого использовался для диагностирования.

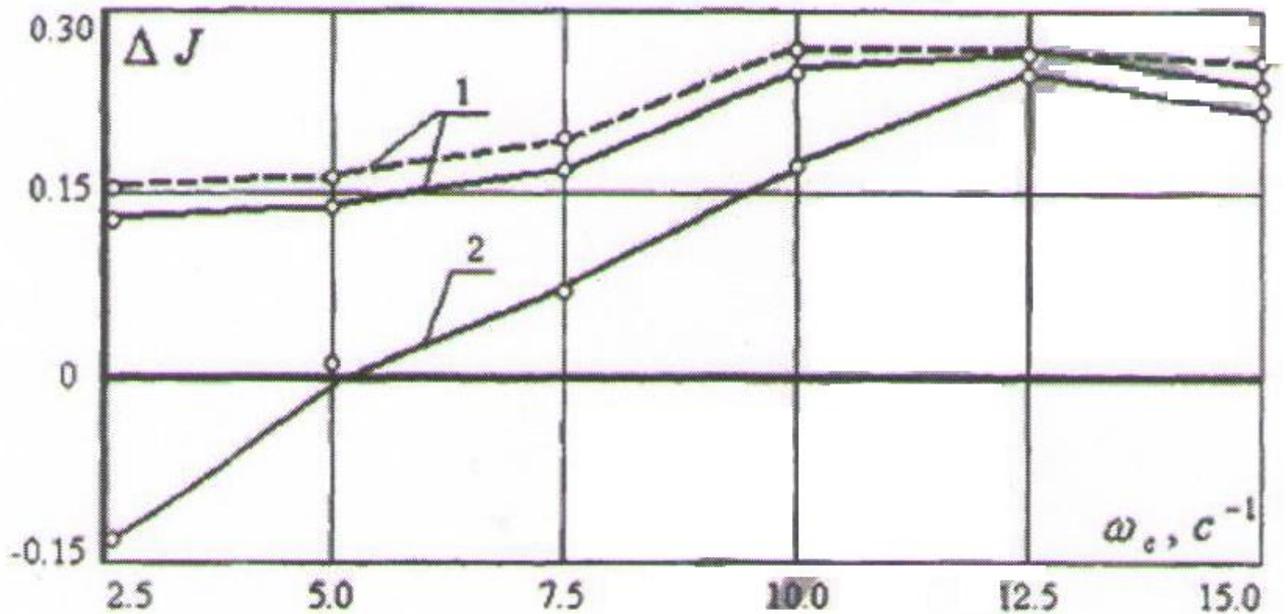


Рис.5.23. Зависимость степени различимости дефектов в ОД №1 от частоты среза формирующего фильтра генератора ПСДП: 1 - для дефекта в блоке 2; 2 - для дефекта в блоке 4

Частота среза формирующего фильтра связана с периодом следования тактовых импульсов генератора ПСДП T_u соотношением.

$$\omega_c = \frac{0.1}{T_u} \quad (6.10)$$

и изменялась путем вариации T_u .

Пунктиром показана зависимость априорного коэффициента различимости дефекта в ДЭ №2. Как видно из графиков, дефект в блоке №4 обнаруживается, начиная с частот среза, больших $5 c^{-1}$. Ширина полосы пропускания ОД на уровне 0.707 составляет $\omega_n = 5 c^{-1}$, а диапазон существенных частот на уровне 0.1 - $\omega_{сч} = 20 c^{-1}$. Полученные результаты подтверждают известное положение, что тестирующие сигналы при идентификации и диагностировании должны иметь спектр не уже полосы пропускания объекта.

Аналогичный эксперимент был проведен для ОД №2. Исследовалась зависимость апостериорной различимости дефектов в динамических элементах №6 (апериодическое звено с постоянной времени $T_{16} = 0.0046 c$) и

№ 16 (реальное дифференцирующее звено с постоянной времени $T_{16}=3$ с) от периода следования тактовых импульсов генератора ПСДП с формирующим фильтром, сигнал которого использовался в качестве входного тестового сигнала ОД.

Сложность диагностирования этой пары структурных дефектов заключается в том, что постоянные времени ДЭ отличаются на четыре порядка.

Моделировались структурные дефекты в динамических элементах в виде одновременного отклонения двух прямых показателей: в ДЭ № 6 $K_6=0.30$ (0.67), $T_6=0.04$ с (0.0046); в ДЭ № 16- $K_{16}=0.1$ (0.74), $T_{16}=10$ с (3). В скобках указаны номинальные значения параметров. На рис.5.24 показаны зависимости апостериорной различимости дефекта в ДЭ № 16 (рис.5.24, а) и в ДЭ №6 (рис.5.24. б) без использования алгоритма адаптации (графики 1) и с использованием алгоритма адаптации по величине априорных коэффициентов различимости дефектов (графики 2).

Диагностирование проводилось с использованием относительных функций чувствительности, множества контрольных точек $Z_3 = \{ 1, 2, 3, 4, 11, 12, 14, 15, 17, 19 \}$ на интервале контроля $T_k=5$ с. Число разрядов регистра сдвига было выбрано $m=11$, в этом случае минимальный период последовательности больше периода контроля $T_n=(2^m-1) \cdot T_{u \min}=81.92$ с $> T_k$. Величина амплитуды импульсов на входе формирующего фильтра: $A=1$. При реализации алгоритма адаптации по величине априорных коэффициентов различимости дефектов использовался пороговый уровень $\square_{\min} = 0.01$, причем из числа контролируемых априорных коэффициентов различимости был исключен коэффициент различимости ДЭ №10 и ДЭ № 11, как имеющий малое значение.

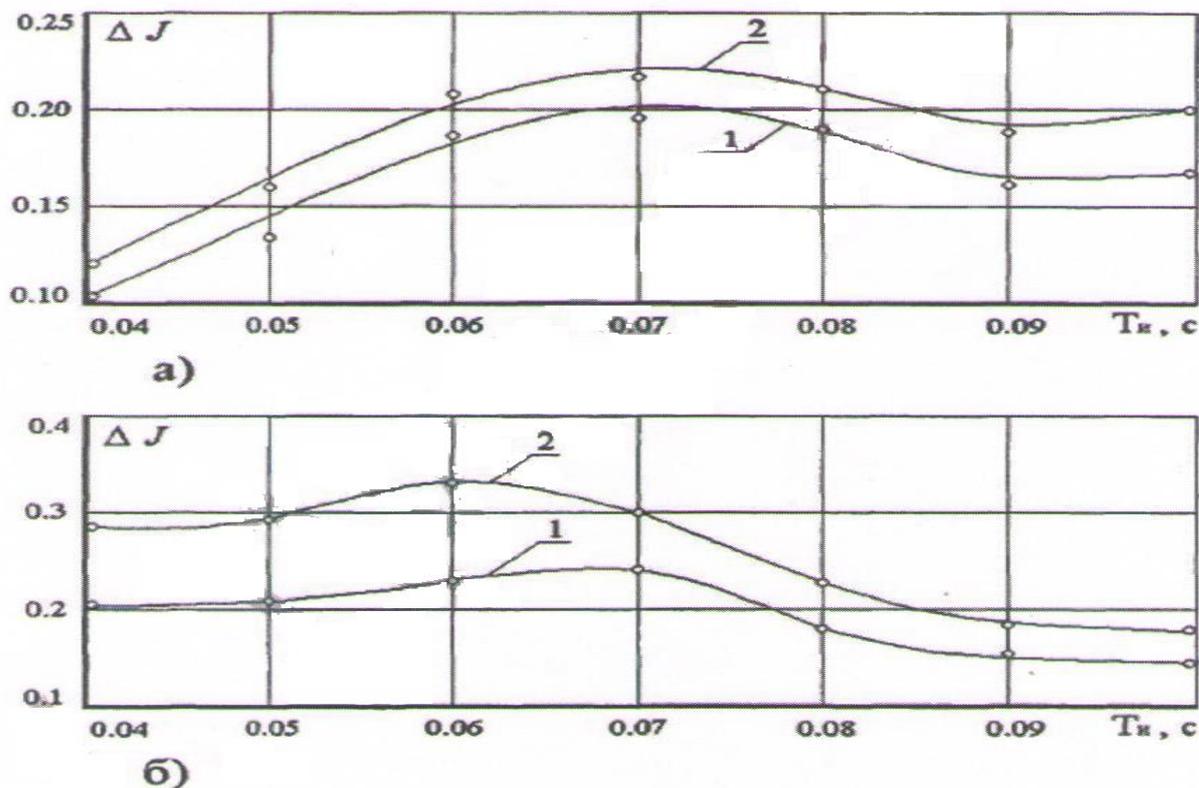


Рис.5.24. Зависимость апостериорной различимости структурных дефектов в ДЭ №16 (а) и ДЭ № 6 (б) ОД № 2 от периода следования тактовых импульсов генератора ПСДП без использования алгоритмов адаптации (1) и с адаптацией по степени различимости (2)

Анализ полученных зависимостей показывает, что, как и следовало ожидать, дефект в ДЭ № 6 определяется с большим коэффициентом различимости на высоких частотах входного тестового сигнала, а дефект в ДЭ № 16 - на более низких частотах. Применение алгоритма адаптации по априорным коэффициентам различимости позволяет повысить степень апостериорной различимости дефектов. На рис.5.25 показан вид выходного сигнала формирующего фильтра генератора ПСДП (входное воздействие на ОД), а на рис.5.26 - реакции объекта и модели на выходе ДЭ № 19 (выходной сигнал датчика положения).

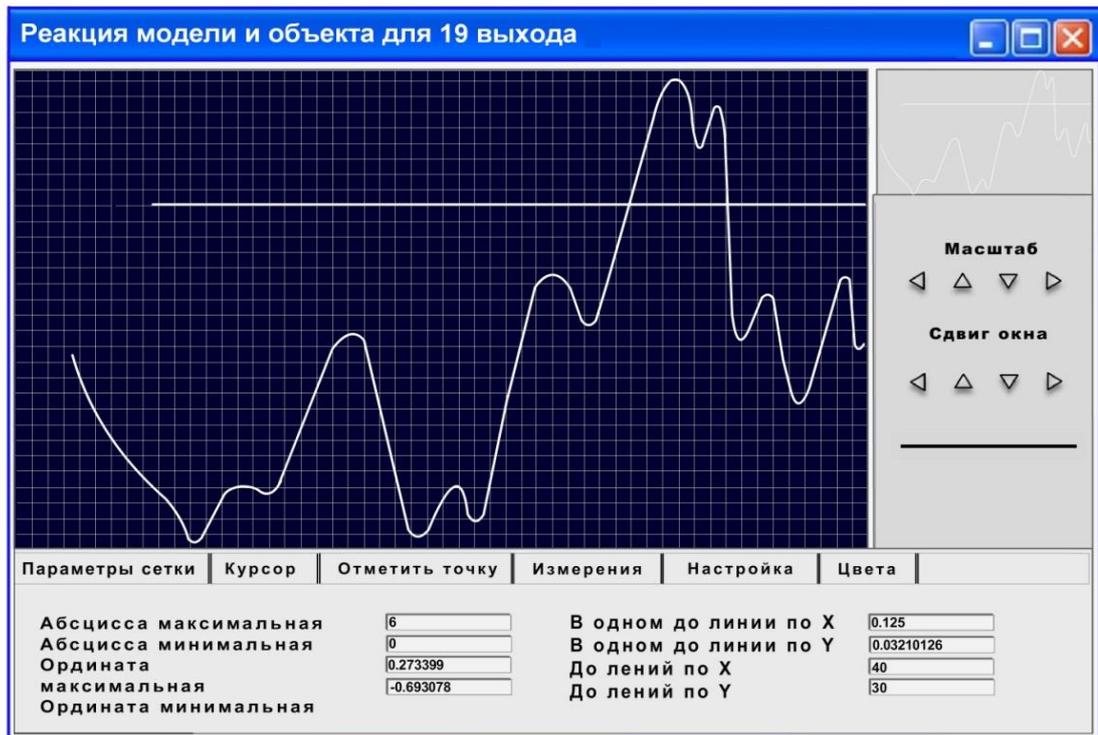


Рис.5.25. Входной псевдослучайный тестовый сигнал ОД

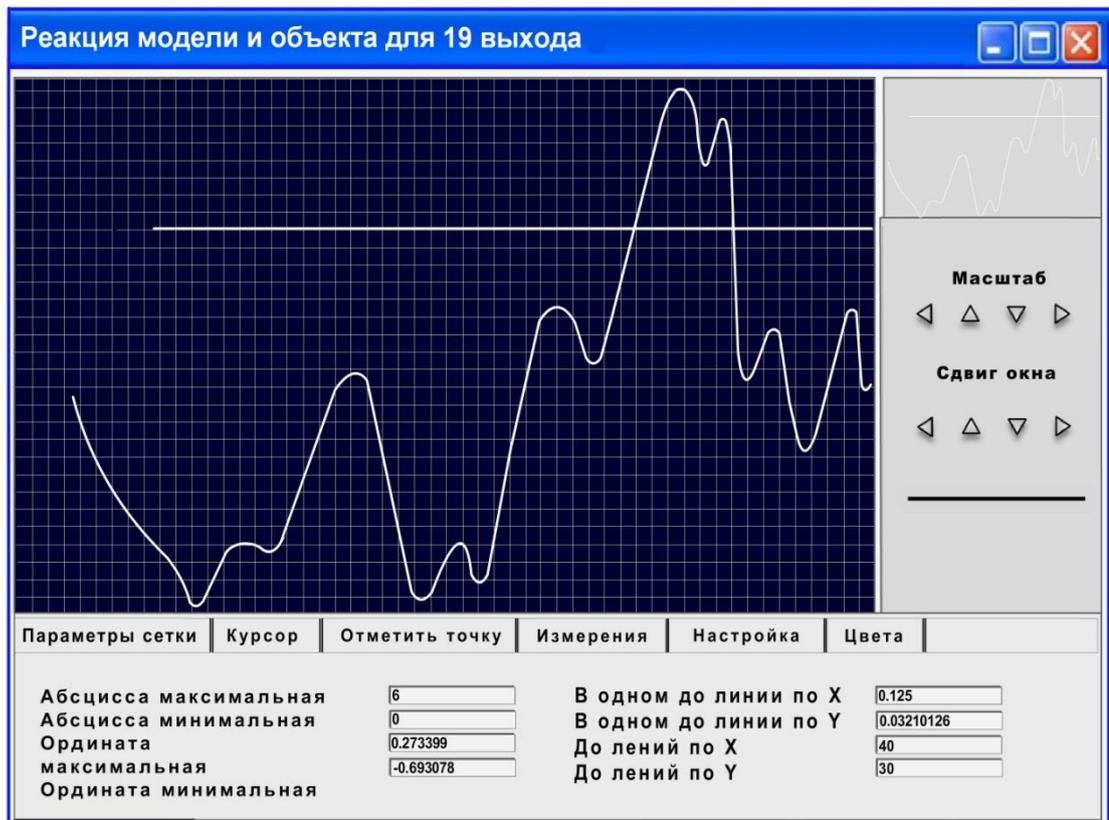


Рис.5.26. Реакции модели и объекта на выходе датчика положения ОД №2

Для объекта диагностирования №3 исследовалось влияние неадекватности диагностической модели на достоверность диагностирования при поиске дефекта в ДЭ № 2 методом преобразований Лапласа с использованием аналитически определенных абсолютных функции чувствительности. На рис.5.27 приведены полученные в результате имитационного моделирования зависимости:

- 1 – для алгоритма поиска структурного дефекта при $\Delta T_2=100\%$;
- 2 – для алгоритма поиска параметрического дефекта при $\Delta T_2=100\%$;
- 3 – для алгоритма поиска структурного дефекта при $\Delta T_2=20\%$;
- 4 – для алгоритма поиска параметрического дефекта при $\Delta T_2=20\%$.

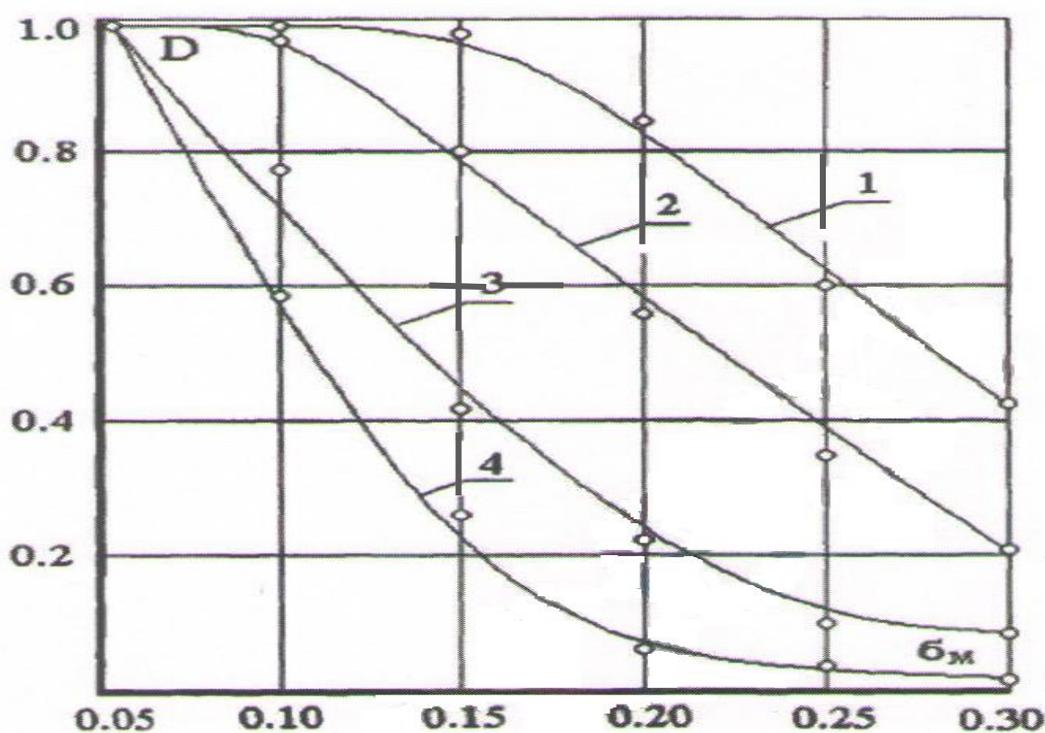


Рис.5.27. Влияние неадекватности диагностической модели σ_m на достоверность диагностирования при поиске одиночного дефекта в ДЭ №2 ОД №3 с использованием алгоритмов поиска параметрических (2,4) и структурных (1,3) дефектов методов преобразований Лапласа и аналитической модели чувствительности

При диагностировании использовался однополярный псевдослучайный двоичный сигнал, $m=7$, время контроля $T_k=10$ с, множество контрольных точек $Z = \{1, 2, 3\}$. Интегральные преобразования осуществлялись с использованием двух параметров $\alpha_1 = \frac{5}{T_k}$; $\alpha_2 = \frac{10}{T_k}$.

Свойства алгоритма преобразований Лапласа совпадают со свойствами алгоритмов диагностирования в частотной области. Алгоритм поиска структурных дефектов обладает лучшими показателями робастности, чем алгоритм поиска параметрических дефектов. Однако, сравнительный анализ зависимостей, представленных на рис.5.10 и рис.5.27, показывает, что с точки зрения требований к неадекватности ДМ, лучшими свойствами обладает алгоритм диагностирования по амплитудным частотным характеристикам, что отчасти объясняется тем, что во временной области был установлен уровень погрешности регистрации сигналов объекта $\sigma_{h(t)} = 0.1$, а в частотной – уровень погрешности определения частотных характеристик – $\sigma_A = 0.05$.

Аналогичные зависимости получены для ОД №4. На рис.5.28 приведены графики, показывающие зависимость достоверности диагностирования при поиске дефекта в блоке №2 с использованием абсолютных структурных функций чувствительности для различных априорных коэффициентов дефекта $2 \phi_{2min}$, на рис.5.29 - аналогичные зависимости в случае использования относительных функций чувствительности. Для всех зависимостей моделировался дефект в виде уменьшения коэффициента усиления $K_2=2$ (4). Диагностирование проводилось с использованием множества контрольных точек $Z = \{1, 2, 3, 5\}$. Априорная различимость дефекта изменялась путем вариации числа разрядов регистр сдвига и периода следования тактовых импульсов генераторе ПСДП. Анализ графиков позволяет сделать вывод, что применение относительных функций чувствительности для диагностирования этого ОД предпочтительнее с точки зрения уровня робастности алгоритма диагностирования.

Полученные зависимости иллюстрируют эффективность использования априорных оценок различимости дефектов для выбора режимов диагностирования объекта.

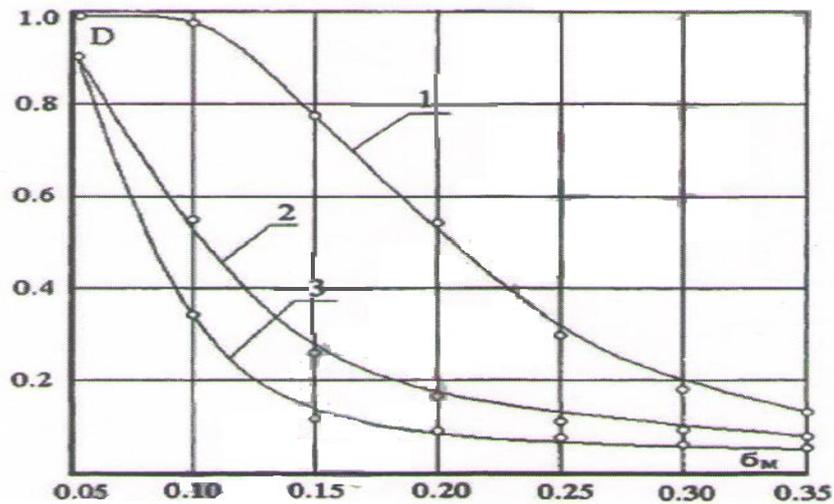


Рис.5.28. Влияние неадекватности ДМ – σ_m на достоверность диагностирования при использовании абсолютных структурных функций чувствительности для различных априорных коэффициентов различимости дефекта в ДЭ №2 ОД № 4:

1- $\phi_{2min}=0.64$; 2- $\phi_{2min}=0.45$; 3- $\phi_{2min}=0.24$

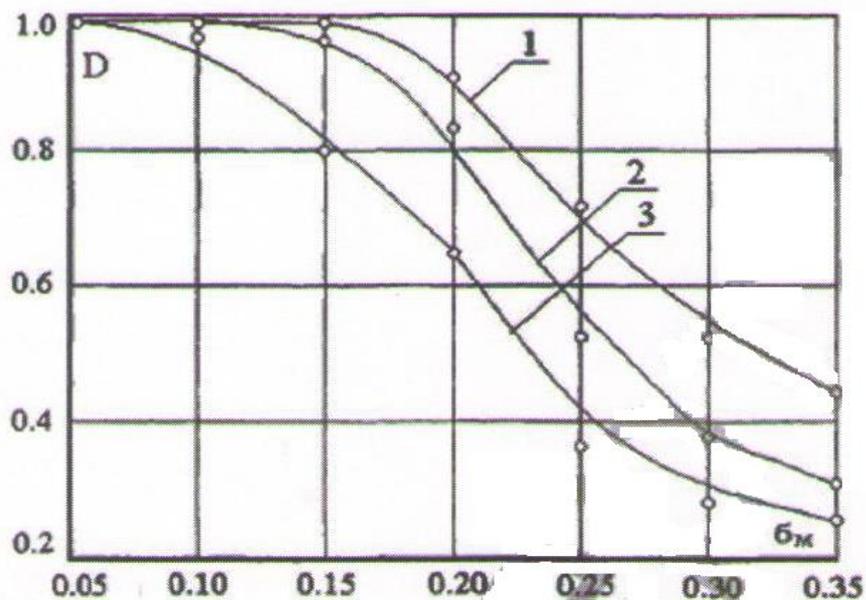


Рис.5.29. Влияние неадекватности ДМ σ_m на достоверность диагностирования при использовании относительных структурных функций чувствительности для различных априорных коэффициентов различимости дефекта в ДЭ №2 ОД № 4: : 1- $\phi_{2min}=0.70$; 2- $\phi_{2min}=0.62$; 3- $\phi_{2min}=0.39$

Графики, представленные на рис.5.28, рис.5.29 показывают, что оценка вероятности правильного обнаружения дефекта прямо пропорциональна величине его априорного коэффициента различимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены особенности использования частотных характеристик для оценки технического состояния САУ. Сформулированы требования к исходному описанию САУ, выполнение которых позволяет достичь удовлетворительной степени формализации получения номинальных частотных характеристик ОД и функций чувствительности этих характеристик к изменению прямых показателей ДМ.

2. Сформулированы требования к структурно-топологической диагностической модели САУ и определены общие принципы её построения. Предложена общая последовательность построения ДМ, основная на принципах однозначности, не избыточности и состоящая из пяти этапов.

3. Подробно рассмотрен этап построения модели $M_{ОД}$ (3). Для построения этой модели используется алгоритмы анализа топологических свойств ориентированных графов. Информации о наличии и составе путей и контуров в графе представляются в виде бинарных матриц R и V , что позволяет свести анализ касания контуров, путей и контуров к операциям умножения этих матриц.

4. Рассмотрена задача выбора под множество контролируемых параметров при заданных ограничениях на достоверность алгоритма $S(v, A_K)$. Сформулирован критерий важности параметров α при диагностировании ОД по частотным характеристикам, зависящих от функции чувствительности этих характеристик к изменению параметров α .

5. Рассмотрены два способа вычисления функции чувствительности частотных характеристик. Оба способа являются точными. Получены выражения для вычисления функции чувствительности частотных характеристик при ограничениях на топологию ОД, которые позволяют производить вычисления без использования комплексной арифметики, что упрощает расчёты.

5. Разработанные в диссертационной работе алгоритмы диагностирования и анализа диагностической модели реализованы в программном комплексе. Программный комплекс обладает набором широких возможностей и позволяет моделировать объекты диагностирования во временной и частотной областях, получать модель чувствительности объекта, использовать модель чувствительности для предварительного анализа свойств диагностической модели и для имитационного моделирования процессов диагностирования при наличии погрешностей измерения динамических характеристик и неадекватности диагностической модели.

6. Проведены численные эксперименты над линейными и нелинейными моделями пяти реальных объектов во временной и частотной областях анализа, которые показали высокую эффективность разработанных алгоритмов анализа диагностической модели и диагностирования.

7. Применение нормированных диагностических признаков и нормированных коэффициентов различимости дефектов, имеющих одну и ту же область значений, позволяет осуществлять сравнительный анализ результатов диагностирования различных объектов с применением различных алгоритмов и прогнозировать ожидаемые результаты диагностирования путем предварительного анализа диагностической модели.

8. Диагностирование с использованием относительных функций чувствительности как во временной, так и в частотной области дает более высокие значения коэффициентов различимости и достоверности диагностирования. Однако применение относительных функций чувствительности требует принятия специальных мер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы технической диагностики/ Под ред. П.П.Пархоменко. М.: Энергия, 1976. 464 с.
2. Карибский В.В. Анализ систем для контроля работоспособности и диагностики неисправностей// Автоматика и телемеханика. 1965. № 2. С. 308-314.
3. Кузнецов П.И., Пчелинцев Л.А., Гайденок В.С. Контроль и поиск неисправностей в сложных системах. М.: Сов. Радио, 1969. 240 с.
4. Кузовков Н.Т. Динамика систем автоматического управления. М.: Машиностроение, 1968. 428 с.
5. Мозгалеvский А.В. Техническая диагностика (непрерывные объекты)// Автоматика и телемеханика. 1978. № 1. С. 145 - 166.
6. Согомоян Е.С. Контроль работоспособности и поиск неисправностей в функционально связанных системах// Автоматика и телемеханика. 1964. № 6. С. 980 - 990.
7. Пархоменко П.П., Согомоян Е.С. Основы технической диагностики. М.: Энергия, 1981. 320 с.
8. Методика выбора диагностических параметров для непрерывных объектов, представленных логическими моделями. Горький: ВНИИНМАШ, Горьковский филиал, 1976. 68 с.
9. Методика выбора диагностических параметров для непрерывных объектов, представленных логическими моделями в форме графа с помощью ЭВМ. Горький: ВНИИНМАШ, Горьковский филиал, 1978. 82 с.
10. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. М.: Наука, 1972. 424 с.
11. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1978. 256 с.
12. Кузьмин И.В., Филиппенко И.Г., Кабаненко В.Ф. Алгоритм синтеза автоматизированных систем контроля (АСК) сложных динамических систем// Вопросы технической диагностики. - Таганрог, 1973. Вып. 10. С. 42-48.

13. А.С. 356628 СССР. Устройство диагностики и коррекции ошибок апериодических звеньев САР/ Г.С.Бритов, Л.А.Мироновский (СССР). -№ 1613934/18-24; Заявл. 31.12.70; Опубл. 10.11.72. Бюл. №32.

14. Анализ объекта в частотной области при решении диагностических задач/ Костанди Г.Г., Краснов И.А., Матвеев В.Ф., Мозгалеvский А.В., Смирнов Ю.Г.; Ленингр. электротехн. ин - т

им. В.И.Ульянова (Ленина). Л., 1978. 11 с. - Деп. в НИИЭИР 16.08.78, №Д-2662.

15. Костанди Г.Г. Устройство контроля работоспособности технических объектов по показателям качества переходной характеристики// Вопросы технической диагностики и управления в сложных системах. Л., 1971. С. 21 - 24.

16. Костанди Г.Г., Краснов И.А., Мозгалеvский А.В. Устройство для измерения коэффициента относительного затухания// Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1973. № 10. С. 45 - 47.

17. Мозгалеvский А.В. и др. Автоматический поиск неисправностей. Л.: Машиностроение, 1967. 245 с.

18. Мозгалеvский А.В., Калявин В.П. Системы диагностирования судового оборудования. Л.: Судостроение, 1987. 224 с.

19. Дмитриев А.К. Распознавание отказов в системах электроавтоматики. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. 104 с.

20. Блинов И.Н., Мозгалеvский А.В. К вопросу об определении работоспособности замкнутой системы// Труды ЛЭТИ. Л., 1966. Вып. 56. С. 179-185.

21. Блинов И.Н., Гаскаров Д.В., Мозгалеvский А.В. Автоматический контроль систем управления. Л.: Энергия, 1968. 152 с.

22. Беляев Ю.К., Ушаков И.А. Оптимальные границы для контрольных допусков// О надежности сложных технических систем. М., 1966. С. 193-203.

23. Абрамов О.В., Бернацкий Ф.И., Здор В.В. Параметрическая коррекция систем управления. М.: Энергоиздат, 1982. 176 с.

24. ГОСТ 20911-75. Техническая диагностика. Основные термины и определения. - Введ. 01.06.76. М.: Изд - во стандартов, 1978. 14 с.

25. Дубровский С.В., Мозгалецкий А.В. Контроль работоспособности САУ с помощью эквивалентной модели// Известия ЛЭТИ. Л., 1971. Вып. 93, ч. 2. С. 96 - 98.

26. Мозгалецкий А.В., Волынский В.И., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика судовой автоматики. Л.: Судостроение, 1972. 223 с.

27. Дубровский С.В., Юдин Ю.В. Понижение порядка уравнения линейных автоматических систем для построения диагностических моделей// Известия ЛЭТИ. Л., 1972. Вып. 107. С. 15 - 22.

28. Тимофеев В.А., Вильнер Г.А. Условия образования структурных схем замкнутых динамических систем, допускающих понижение порядка передаточной функции при сохранении переходного процесса// Кибернетические методы в диагностике. Рига, 1973. С. 63 -69.

29. Чинаев П.И., Шкитин В.А. Один из методов технической диагностики систем класса автоматического управления// Техническая диагностика. М., 1972. С. 109 - 113.

30. Дятлов В.А., Кабанов А.Н., Милов Л.Т. Контроль динамических систем. Л.: Энергия, 1978. 88 с.

31. Бритов Г.С., Игнатъев М.Б., Мироновский Л.А. Непрерывная диагностика динамических систем// Техническая диагностика. М., 1972. С. 96-98.

32. Бритов Г.С., Мироновский Л.А. Критерий избыточности динамических систем// Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. - 1980. № 1.С. 149- 155.

33. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.

34. Клетский Е.Д. Применение теории информации к отысканию неисправностей в технических устройствах// Зарубежная радиоэлектроника. 1961. № 9. С. 124 - 138.

35. Глазунов Л.П. Структурные методы диагностики сложных систем// Поиск неисправностей в технических системах при их производстве и эксплуатации. Л., 1977. С. 10- 12.

36. Глазунов Л.П., Мозгалеvский А.В. Особенности анализа диагностических процедур сложных систем автоматического управления// Техническая диагностика. М., 1972. С. 147 - 151.

37. Ксенз С.П. Поиск неисправностей в радиоэлектронных схемах методом функциональных проб. М.: Сов. радио. 1965. 135 с.

38. Кузьмин И.В., Сукесов Э.А. К вопросу о синтезе стратегии поиска неисправности в динамической системе// Вопросы технической диагностики. Таганрог, 1973. Вып. 10. С. 157 - 158.

39. Дмитриев А.К., Александров В.В. Применение алгоритмов распознавания образов в задачах технической диагностики// Техническая диагностика. М., 1972. С. 127-130.

40. Шибанов Г.П. Распознавание в системах автоконтроля. М.: Машиностроение, 1973. 424 с.

41. Киселев Н.В., Сечкин В.А. Техническая диагностика методами нелинейного преобразования. Л.: Энергия, 1980. 112 с.

42. Об одном методе оценки действительного состояния системы управления по временной характеристике// Вопросы технической диагностики/ Мозгалеvский А.В. и др. Таганрог, 1973. Вып. 9. С. 59 -64.

43. Шибанов Г.П., Городецкий Б.В., Тотаев Л.Т. Техническая диагностика систем методом распознавания двумерных сигналов// Вопросы технической диагностики. Таганрог, 1970. Вып. 1 С. 10 - 18.

44. Боков А.С., Никитин Г.А., Чапцов Р.П. Об одном подходе к диагностированию линейных динамических систем// Вопросы технической диагностики. Ростов-на-Дону, 1976. С. 69 - 72.

45. Гельфандбейн Я.А. Методы кибернетической диагностики динамических систем. Рига: Зинатне, 1967. 544 с.

46. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. М.: Энергия, 1979. 240 с.

47. Кейн В.М., Тимофеев В.А. Определение динамических свойств линейной системы по поведению ее при известном возмущающем воздействии// Кибернетика и диагностика. Рига, 1968. Вып. 2. С. 203-211.
48. Сейдж Э.П., Мелса Д.Л. Идентификация систем управления. М.: Наука, 1974. 248 с.
49. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 684 с.
50. Шамин В.Б. Частотный метод поиска неисправного элемента в непрерывном объекте с обратной связью// Поиск неисправностей в технических системах при их производстве и эксплуатации. Л., 1977. С. 49-50.
51. Duhamel P, Rault J.C. Automatic test generation techniques for analog circuits and systems// IEEE trans, on circuits and systems. 1979. № 7. P. 411-439.
52. Прямые и обратные задачи теории чувствительности/ Городецкий В.И. и др.// Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1971. № 5. С. 177- 187.
53. Крутько П.Д. Решение задачи идентификации методом теории чувствительности// Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1969. №6. С. 146-153.
54. Priester R.W., Clary J.B. New measures of testability and complexity for linear analog failure analysis// IEEE trans, on computers. 1981. № 11.V. C-30. P. 884-888.
55. Блинов И.Н., Мозгалеvский А.В. Исследование работоспособности автоматической системы при внешних возмущениях// Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1969. № 3. С. 195 - 198.
56. Маслов А.Я., Татарский В.Ю. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1972. 264 с.
57. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники/ Шишонок Н.А. и др. М.: Сов. радио, 1964. 551 с.
58. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1970. 215 с.
59. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976. 424 с.

60. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование линейных динамических систем// Автоматика и телемеханика. 1979. № 8. С. 120-128.
61. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1980. №8. С. 96-121.
62. Шумский А.Е. Поиск дефектов в нелинейных системах методом функционального диагностирования"// Автоматика и телемеханика. 1991. № 12. С. 148- 155.
63. Жирабок А.Н. Поиск дефектов в нелинейных системах методом функционального диагностирования на основе обобщенных алгебраических инвариантов// Автоматика и телемеханика. 1994. № 7. С. 160- 169.
64. Жирабок А.Н., Шумский А.Е. Функциональное диагностирование непрерывных динамических систем, описываемых уравнениями с полиномиальной правой частью// Автоматика и телемеханика. 1987. №8. С. 154- 164.
65. Акимов А.Н. Метод идентификации отказов динамических систем// Автоматика и телемеханика. 1992. № 6. С. 161 - 166.
66. Жирабок А.Н. Функциональное диагностирование на основе соотношений паритета// Автоматика и телемеханика. 1998. № 2. С. 133- 142.
67. Жирабок А.Н., Шумский А.Е. Функциональное диагностирование нестационарных динамических систем// Автоматика и телемеханика. - 1989. - N 11. - с. 146 - 153.
68. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy — a survey and some new results// Automatica. 1990. V.26. N 3. P. 459 - 474.
69. Patton R. Robast model-based fault diagnosis: the state of the art// Proc. IF AC Symp. SAFEPROCESS'94. Espoo, 1994. P. 1-24.
70. Gertler J., Kunwer M.M. Optimal residual decoupling for robust fault diagnosis// Proc. Int. Confer. TOOLDIAG'93. Toulouse, 1993. P. 436 - 452.
71. Gertler J. Residual generation in model-based fault diagnosis// Control Theory and Advanced Technol. 1993. V. 9. P. 259 - 285.

72. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование нелинейных дискретных объектов// Автоматика и телемеханика. 1989. № 6. С. 150- 157.
83. Isermann R., Balle P. Trends in application of model based fault detection and diagnosis of technical processes// Proc. IFAC 13th Triennial World Congress. San Francisco, 1996. V. N. P. 1-12.
73. Isermann R. Integration of fault detection and diagnosis methods// Proc. IFAC Symp. SAFEPROCESS'94. Espoo, 1994. P. 597-612.
74. 74. Martin K.F., Moavenian M. A comparison of fault detection filters using multiple inputs, parallel observers and residual processing// Proc. IFAC Symp. SAFEPROCESS'94. Espoo, 1994. P. 551 - 555. Hofling T., Isermann R. Adaptive parity equations advanced parameter estimation for fault detection and diagnosis// Proc. IFAC 13th Triennial World Congress. San Francisco, 1996. V. N. P. 55 - 60.
75. Розенвассер Е.М., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981. 464 с.
76. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Применение теории чувствительности в задачах автоматического управления// Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1970. № 2. С. 202 - 212.
77. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.
78. Пархоменко П.П. Основные задачи технической диагностики// Техническая диагностика. М., 1972. С. 7 - 22.
79. Уманский В.В., Городецкий Б.В., Тотаев Д.Т. О выборе объема параметров, контролируемых АСК// Вопросы технической диагностики. Таганрог, 1972. Вып. 5. С. 48 - 54.
80. Сагунов В.И. Количественная оценка глубины диагностирования/Совершенствование технологической подготовки производства (практика предприятий г. Горького и области). М.: Изд-во стандартов, вып. 9, 1978. С.95 - 99.
81. Мозгалевский А.В., Калявин В.П., Костанди Г.Г. Диагностирование электронных систем. JL: Судостроение, 1984. 224 с.

82. Введение в техническую диагностику/Под ред. К.Б.Карандеева. М.: Энергия, 1968. 224 с.

83. Карпов А.И., Карпова Н.Н., Малюков Н.Н. Об оптимальном выборе воздействующей функции в задачах технической диагностики//Автоматика и электроприборостроение. Вестник Киевского политехнического института. 1980. № 17. С.131-133.

84. Осис Я.Я. Минимизация числа точек контроля/ /Автоматическое управление. Рига: Зинатне, 1967. С. 173 - 179.

85. Розенвассер Е.Н. О математическом описании многомерных линейных систем на основе моделей "вход-выход"// Автоматика и телемеханика. 1994. № 1. С. 47 - 62.

86. Мироновский Л.А. Тестовый контроль передаточных функций стационарных объектов// Известия вузов. Приборостроение. 1984. № 10. С. 22 - 26.

87. Мироновский Л.А., Юдович В.С. Диагностирование двухканальных систем с недоступным входом// Известия вузов. Приборостроение. 1989. № 12. С. 8- 12.

88. Автоматизированное проектирование систем автоматического управления/ Я.Я.Алексанкин, А.Э.Бржозовский, В.А.Жданов и др.; Под ред. В.В.Солодовникова. М.: Машиностроение, 1990. 332 с.

89. ЮЗ.Крутько П.Д., Максимов А.И., Скворцов Л.М. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем. М.: Радио и связь, 1988. 306 с.

90. Вавилов А.А., Солодовников А.И. Экспериментальное определение частотных характеристик автоматических систем. М.: Госэнергоиздат, 1963. 252 с.

91. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 304 с.

92. Дженкинс Г., Ватте Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972. 288 с.

93. Маркел Д.Д., Грэй А.Х. Линейное предсказание речи. М.: Связь, 1980. 308 с.

94. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. М.: Энергия, 1980. 312 с.
95. Вавилов А.А. Структурный и параметрический синтез сложных систем. Л.: ЛЭТИ, 1979. 87 с.
96. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
97. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надежность). М.: Сов. радио, 1977. 216 с.
98. Костанди Г.Г., Мозгалевский А.В., Шалобанов С.В. Частотные методы диагностирования непрерывных САУ// IX Всесоюзное совещание по проблемам управления. Ереван, 1983. Тезисы докл. М., 1983. С. 513 - 514.
99. Методика диагностирования непрерывных динамических объектов по их частотным характеристикам. Горький: ВНИИНМАШ, горьковский филиал, 1977. 60 с.
100. Латышев А.В. Определение неисправностей подсистемы в непрерывном объекте// Техническая диагностика электронных систем. Киев: Наукова думка, 1982. С. 88-93.
101. Латышев А.В. О диагностике неисправностей динамических систем и их аналоговых моделей// Идентификация и диагностика электронных устройств и систем. Киев: Наукова думка, 1981. С. 101 - 108.
102. Климов Е.Н., Попов С.А., Сахаров В.В. Идентификация и диагностика судовых технических систем. JL: Судостроение, 1978. 176 с.
103. Мозгалевский А.В., Костанди Г.Г., Шалобанов С.В. Поиск дефектов в линейной САУ с использованием функций чувствительности частотных характеристик // Известия вузов. Приборостроение. 1983. Т. 26. № 5. С. 28-32.
104. А.С. 1462254 СССР. Способ диагностирования неисправностей динамических объектов/С.В. Шалобанов, В.В.Воронин, Г.Г.Костанди. № 4324061/24-24; заявл. 3.08.87; опубл. 28.02.89 бюл. №8.
105. Бессонов А.А. Прогнозирование характеристик надежности автоматических систем. JL.: Энергия, 1971. 152 с.

106. Шалобанов С.В. Структурно – матричная диагностическая модель линейной системы управления// Методы и средства обработки информации. Сборник научных трудов НИИ КТ. Вып. 1. Хабаровск: Изд. - во Хабар, гос. техн. ун-та, 1998. С. 7 - 11.

107. Бобышев В.В., Шалобанов С.В. Использование структурно-матричных моделей для диагностирования динамических систем // Математическое моделирование. Сборник научных трудов НИИ КТ. Вып. 9. Хабаровск: Изд. - во Хабар, гос. техн. ун-та, 1999. С. 73 -78.

108. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1980. 976 с.

109. Патент России 2143720. Способ- поиска неисправностей в динамических системах / Шалобанов С.В., Бобышев В.В. № 98122078/09 (024220); заявл. 07.12.98; опубл. 27.12.99, бюл. № 36.

110. Бессонов А.А., Загашвили Ю.В., Маркелов А.С. Методы и средства идентификации динамических объектов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1989. 280 с.

111. Баглюк Ю.В., Кубышкин В.В., Файкин Т.М. К вопросу оценки технического состояния элементов замкнутой САУ в процессе рабочего функционирования/ IV Всесоюзное совещание по технической диагностике. Тезисы докл. Часть II. М.: ИПУ, 1979. С. 46-48.

112. Кулик А.С., Успенко В.И. Введение в теорию диагностирования линейных непрерывных систем управления. Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1982. 96 с.

113. Испарян Р.А., Калабин А.Л., Шейнман А.А. Выбор параметра преобразования Лапласа при решении обратных задач в области изображений// Известия вузов. Приборостроение. - 1987. - № 8. С. 84 - 87.

114. Математические основы теории автоматического регулирования /Под ред. Б.К.Чемоданова. Том II. М.: Высшая школа, 1977. 455 с.

115. Патент России 2110828. Способ диагностирования аperiodических звеньев и устройство для его осуществления/ С.В.Шалобанов. № 96112627/09 (018726); заявл. 24.06.96, опубл. 10.05.98, бюл. № 13.

116. Патент России 2133975. Способ контроля параметров звеньев систем управления и устройство для его осуществления/ Чигринец А.Н., Шалобанов С.В. № 98115917/09 (017484); заявл. 17.08.98; опубл. 27.07.99, бюл. №21.

117. Патент России 2136033. Способ контроля динамического блока в составе системы управления и устройство для его осуществления/Шалобанов С.В. № 98115937/09 (017487); заявл. 17.08.98; опубл. 27.08.99, бюл. № 24.

118. Бобышев В.В., Шалобанов С.В. Моделирование и отладка диагностического обеспечения динамических систем// Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ N 50990000079, ВНИИЦ, 1999.

119. Бобышев В.В., Шалобанов С.В. Моделирование и отладка алгоритмов диагностирования линейных динамических систем// Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ N 50990000080, ВНИИЦ, 1999.

120. Белова Д.А., Кузин Р.Е. Применение ЭВМ для анализа и синтеза автоматических систем управления. М.: Энергия, 1979. 264 с.

121. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств: Учеб. Пособие для вузов/С.В.Пантюшин и др.; Под ред. И.М.Макарова. М.: Высш. шк., 1986. 175 с.

122. Разработка методов и программных средств для автоматизации процессов анализа контроле пригодности и диагностирования непрерывных систем управления: Отчет о НИР/НИИ КТ; Руководитель С.В.Шалобанов. - № ГР 01.950002182. Хабаровск, 1996 г. 89 с.

123. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1980. 616 с.

124. Топчеев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. М.: Машиностроение, 1989. 752 с.

125. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами/Под ред. В.И.Круповича, Ю.Г.Барыбина, М.Л.Самовера. М.: Энергоиздат, 1982. 416 с.

126. Патент России 2099766. Способ функционального диагностирования линейных систем управления/ С.В.Шалобанов, А.В.Кочетов, В.В.Воронин, Т.А.Корешкова. № 93012586/09/011703; заявл. 9.03.93, опубл. 20.12.97, бюл. № 35.

127. Патент России 2084945. Способ диагностирования неисправностей динамических объектов и устройство для его осуществления/ А.В. Кочетов, А.Б.Мишин, С.В.Шалобанов. № 94010466/09/010332; Заявл. 25.03.94, опубл. 20.07.97, бюл. № 20.

128. Патент России 2156494. Способ контроля параметров звеньев систем управления и устройство для его осуществления/ Шалобанов С.В., Чигринец А.Н. № 97117192/09(017949); заявл. 04.08.99; опубл. 20.09.2000, бюл. № 26.

129. Патент России 2138072. Способ диагностирования динамического объекта с обратной связью и устройство для его осуществления/ Шалобанов С.В. - № 98115902/09 (017476); заявл. 17.08.98; опубл. 20.09.99, бюл. № 26.

130. Воронин В.В., Костанди Г.Г., Шалобанов С.В. Анализ топологии систем автоматического управления/ //Алгоритмы и программы. Инф. бюл. ГосФАП СССР. 1984. № 6 (63). С. 68 - 69.

131. Воронин В.В., Костанди Г.Г., Шалобанов С.В. Вычисление частотных характеристик систем автоматического управления//Алгоритмы и программы. Инф. бюл. ГосФАП СССР. 1984. № 6 (63). С. 69.

132. Корешкова Т.А., Кочетов А.В., Шалобанов С.В. Программный комплекс для исследования методов диагностирования линейных систем управления// Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ N 940064, РосАПО, 1994.

133. Мишин А.Б., Шалобанов С.В. Анализ контроле пригодности динамических объектов с последовательным соединением звеньев//

134. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 950446, РосАПО, 1995.

135. Мишин А.Б., Шалобанов С.В. Исследование способа тестового диагностирования линейного динамического объекта с обратной связью// Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 950447, РосАПО, 1995.

136. Поиск дефектов в линейных динамических объектах с использованием машинных методов/ В.А.Гуляев, Г.Г.Костанди, А.В. Мозгалевский, С.В.Шалобанов//Препринт № 331. Киев: Институт электродинамики АН УССР, 1983. 24 с.