

На правах рукописи



Лукоянов Егор Васильевич

**Диагностирование бортовых систем обработки информации и  
управления с использованием динамических моделей**

Специальность: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка  
информации

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена в Государственном научном центре  
Российской Федерации  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
**Колесов Николай Викторович**
- Оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта (РУТ МИИТ), г. Москва  
**Сперанский Дмитрий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент факультета «Систем управления и робототехники» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО) г. Санкт-Петербург  
**Кремлев Артем Сергеевич**
- Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП)

Защита состоится «06» декабря 2021 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.387.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197101, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru) в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Автореферат разослан «05» октября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.387.03,  
к.т.н., профессор



В.В. Цехановский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень научной проработки темы диссертации.** Разработка сложных бортовых систем обработки информации и управления всегда сопряжена с необходимостью удовлетворения целому набору технических требований и ограничений, т.е. проблема носит существенно комплексный характер. При этом среди важных оказываются вопросы диагностирования, поскольку от качества их решения зависят надежность и отказоустойчивость систем. Проектируя средства диагностирования (СД) специалисты вынуждены преодолевать высокую размерность системы, с которой можно справиться, используя иерархический подход. В этом случае компоненты системы, связанные отношением включения, размещаются по уровням сложности так, что модель компоненты более высокого уровня представляется композицией моделей более низкого уровня. Для каждого уровня синтезируются свои СД, ориентированные на отказы информационных связей между компонентами предыдущего уровня. Применяемые при этом решения основываются на техниках функционального и тестового диагностирования (ФД и ТД). В первом случае диагностирование осуществляется в процессе штатной работы системы, во втором случае система переводится в специальный режим, когда на ее вход вместо рабочих подаются тестовые последовательности.

Для обоих типов диагностирования в современной научной литературе представлены решения, соответствующие различным постановкам задачи диагностирования и объектам разных уровней сложности. Среди наиболее известных авторов, занимавшихся проблемой ТД, можно назвать Preparata F. P., Metze G., Chien R. T., Бурдонова И. Б., Данилова В.В., Сперанского Д.В., Колесова Н.В. и др. Также большой вклад внесли в решение задач диагностирования, но в области ФД следующие авторы Patton R.J., Isermann R., Lafortune S., Frank P.M., Sampath M., Clark R.N., Подкопаев Б.П., Пархоменко П.П., Жирабок А.Н., Мироновский Л.А., Шумский А.Е. и др. Тем не менее, время выдвигает в данной области новые проблемы, требующие углубленного исследования. Так в области ТД оказались мало исследованными вопросы диагностирования сложных распределенных вычислительных систем, а в области ФД – вопросы диагностирования при наличии неопределенности в модели объекта диагностирования. Эти вопросы исследуются в настоящей диссертации, что и определяет ее актуальность. В обоих этих случаях исследования опираются на динамические модели объектов.

**Объект исследования** – бортовые системы обработки информации и управления.

**Предметом исследования** являются методы тестового и функционального диагностирования на основе динамических моделей.

**Цель работы** состоит в исследовании и развитии методов диагностирования нарушений в сложных бортовых системах обработки информации и управления (СОИУ) путём совершенствования используемых

диагностических моделей и снижения сложности используемых процедур синтеза средств диагностирования.

Для достижения поставленной цели решены следующие *задачи*:

- проведен анализ методов тестового и функционального диагностирования бортовых СОИУ;
- разработан алгоритм синтеза наблюдаемой и управляемой иерархической динамической периодически нестационарной модели для распределенных вычислительных систем (РВС) реального времени;
- сформулированы и доказаны достаточные условия наблюдаемости и управляемости иерархической модели для бортовых РВС реального времени;
- разработан алгоритм синтеза теста для обнаружения отказов в бортовых РВС реального времени;
- разработан алгоритм функционального диагностирования для обнаружения и поиска отказов в бортовых системах управления (СУ) в условиях наличия в их моделях неопределенностей;
- подтверждена эффективность разработанных алгоритмов тестового и функционального диагностирования на примере навигационного комплекса (НК) автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА).

**Научная новизна** результатов диссертационной работы:

- 1) Алгоритм синтеза наблюдаемой и управляемой иерархической динамической периодически нестационарной модели для бортовых РВС реального времени, которая позволяет сокращать объем диагностической информации, передаваемой по каналам обмена.
- 2) Достаточные условия наблюдаемости и управляемости иерархической диагностической динамической модели для бортовых РВС реального времени.
- 3) Алгоритм синтеза теста для бортовых РВС реального времени, который обнаруживает любые нарушения адресации в межмодульных обменах РВС.
- 4) Алгоритм функционального диагностирования бортовых СУ в условиях наличия в их моделях неопределенностей, использующий банк интервальных наблюдателей и нечеткие правила принятия решения об отказе для решения задачи поиска отказов.

**Практическая значимость** результатов диссертационной работы:

- 1) Предложенные алгоритмы синтеза иерархической модели и проверяющего теста позволяют повысить эффективность применяемых на практике средств диагностирования бортовых РВС реального времени.
- 2) Разработанный алгоритм функционального диагностирования позволяет решать задачу поиска аппаратных отказов в бортовых СУ для случая наличия в их моделях неопределенностей, повышая их уровень надежности и отказоустойчивости.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использовались теории автоматического управления, линейной алгебры, математического анализа, распределенных вычислений, алгоритмов и структур данных, нечеткой логики, компьютерного моделирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) Алгоритм синтеза наблюдаемой и управляемой иерархической динамической периодически нестационарной модели для бортовых РВС реального времени.

2) Достаточные условия наблюдаемости и управляемости иерархической модели для бортовых РВС реального времени.

3) Алгоритм синтеза теста для бортовой РВС реального времени.

4) Алгоритм функционального диагностирования бортовых СУ в условиях наличия в их моделях неопределенностей.

**Степень достоверности** научных и практических результатов подтверждается использованием корректных математических приемов, сопоставлением аналитических результатов и данных, полученных в ходе математического моделирования и экспериментальных исследований, критическим обсуждением результатов работы на научно-технических конференциях.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на XII Международном симпозиуме Intelligent Systems (Москва, 2016 г.), X Международном симпозиуме IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (Варшава, 2018 г.), III Международной научной конференции по проблемам управления в технических системах (Санкт-Петербург, 2019 г.), Международных семинарах «Навигация и управление движением» (International workshop navigation and motion control, Санкт-Петербург, 2016, 2017, 2019 гг., Самара, 2020 г.), XVIII – XXIII Конференциях молодых ученых «Навигация и управление движением» (Санкт-Петербург, 2016-2021 гг.), XXXI Конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова (Санкт-Петербург, 2019 г.), XIII Всероссийском совещании по проблемам управления (Москва, 2019 г.), XII Мультиконференции по проблемам управления (Дивноморское, 2019 г.), VIII Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана» (Владивосток, 2019).

Автор находился на научной стажировке в Университете Севильи (Universidad de Sevilla), проходящей в рамках VIII International Summer School on Fault Diagnosis of Complex Systems, г. Севилья, 17.06.2019 – 21.06.2019 г.

**Внедрение и апробация результатов.**

Основные результаты работы использованы при выполнении грантов РФФИ 16-08-00530а и 19-08-00052а, кроме того, предложенные решения в рамках инициативной работы в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»» были применены при разработке навигационного комплекса для АНПА.

**Научная специальность, которой соответствует диссертация**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, отрасль – технические науки. Диссертация соответствует пункту 4 паспорта специальности 2.3.1 – разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

### Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 22 работы, из них 4 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК, 4 публикаций в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, и 14 публикаций в прочих изданиях, индексируемых РИНЦ.

### Личный вклад автора.

В диссертационной работе изложены результаты, которые были получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, перечня использованных аббревиатур, списка публикаций автора, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 153 страницы, в тексте имеется 42 рисунка, 23 таблицы, список литературы содержит 134 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определены цели и основные задачи исследования, формулируются научная новизна и практическая значимость полученных результатов работы. Приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор современных методов диагностирования систем обработки информации и управления. Обзор построен в соответствии с порядком, диктуемым иерархическим подходом. В результате в этой области выделены недостаточно изученные проблемы, связанные с высокоуровневым тестированием распределенных систем, а также с диагностированием систем в условиях модельной неопределенности. Изучение этих проблем и составило основное содержание диссертационных исследований.

**Во второй главе** исследуются диагностические динамические модели, используемые при решении двух задач. Первая из задач – это ТД бортовых РВС обработки информации, вторая задача – это ФД бортовых СУ. В первом случае диагностирование осуществляется на основе специально формируемых тестовых воздействий во время перерывов в функционировании диагностируемой системы (ДС) или ее подсистемы по прямому назначению (рисунок 1а), во втором – на основе рабочих воздействий в процессе функционирования диагностируемой системы или ее подсистемы по прямому назначению (рисунок 1б).

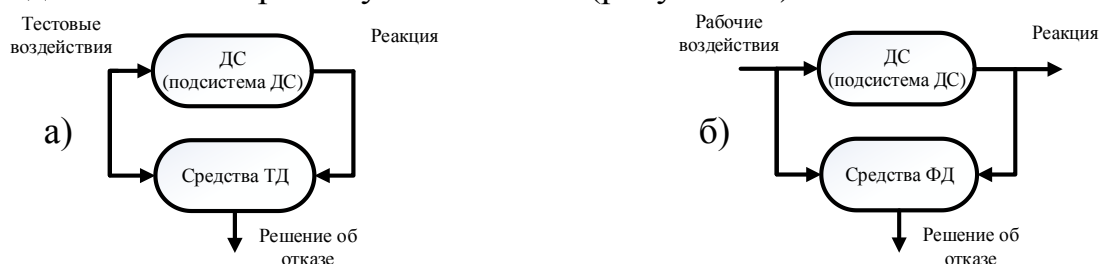


Рисунок 1 – Тестовое (а) и функциональное (б) диагностирование.

Характерной особенностью бортовых РВС является обработка в режиме реального времени периодического потока входных данных, поступающих в общем случае с различных датчиков. Представим РВС как композицию программных модулей (ПМ), составляющих программное обеспечение (ПО) системы. В этом случае класс рассматриваемых отказов включает всевозможные нарушения в адресации обменов между ПМ, размещенными на процессорах РВС и обменивающимися необходимой информацией асинхронно, т.е. по ее готовности. Исследуемая в диссертации диагностическая модель, ориентирована на решение проблемы ТД и представляет собой двоичную линейную динамическую систему (линейный конечный автомат). Особенностью рассматриваемого подхода является то, что диагностическая модель встраивается в систему, выполняется параллельно с основным ПО системы и позволяет упрощать процесс ее ТД. В силу указанной особенности подход назван диагностированием с параллельной моделью. Кроме того, снимается ограничение, что процесс ТД проходит во время перерывов в функционировании ДС.

В работах Грузликова А.М. и Колесова Н.В. предложены алгоритмы синтеза диагностической модели в рамках ТД с параллельной моделью. В настоящей главе изложен более общий подход к синтезу модели, а также приводятся доказательства условий наблюдаемости и управляемости для предлагаемой иерархической параллельной модели. Использование усовершенствованной модели позволяет сокращать объем диагностической информации, передаваемой между ПМ, тем самым улучшая показатели её надежности, а её свойства наблюдаемости и управляемости существенным образом влияют на сложность процедур построения тестов.

Идея подхода к ТД РВС с параллельной моделью состоит в следующем. На рисунке 2а представлен граф межмодульных связей исходной системы. Система содержит три функционально связанных ПМ: ПМ<sub>1</sub>, ПМ<sub>2</sub> и ПМ<sub>3</sub>, которые могут быть размещены как на разных процессорах системы, так и на одном. Каждый из ПМ на основе входных данных ( $u_1$  – для ПМ<sub>1</sub>,  $u_2$  и  $u_3$  – для ПМ<sub>2</sub>,  $u_1$ , и  $u_2$  – для ПМ<sub>3</sub>) формирует выходные ( $y_1, y_2$  и  $y_3$  соответственно). Входные данные поступают и обрабатываются в реальном времени с некоторым заданным периодом. При этом в системе все входные потоки конкретного ПМ являются аргументами реализуемой им функции, необходимыми для ее вычисления. На рисунке 2б система приведена совместно с параллельной моделью  $S$ , включающей три компоненты:  $\pi_i$ ,  $i = \overline{1,3}$ . Здесь  $\pi_i$  – диагностический алгоритм, который является вводимой избыточностью. СД формируют для системы тестовые данные ( $u'_1$  – для ПМ<sub>1</sub>,  $u'_2$  – для ПМ<sub>2</sub>), дополняя ими входные данные для системы, и анализируют выходную реакцию –  $y'_3$ . В состав СД входят генератор тестов (далее – ГТ), генератор эталонных реакций (далее – ГЭР) и компаратор (далее – К). В каждый ПМ по каналам обмена поступает информация,

которая обрабатывается штатными алгоритмами, решающими заданные прикладные задачи (навигации, гидроакустики и др.).

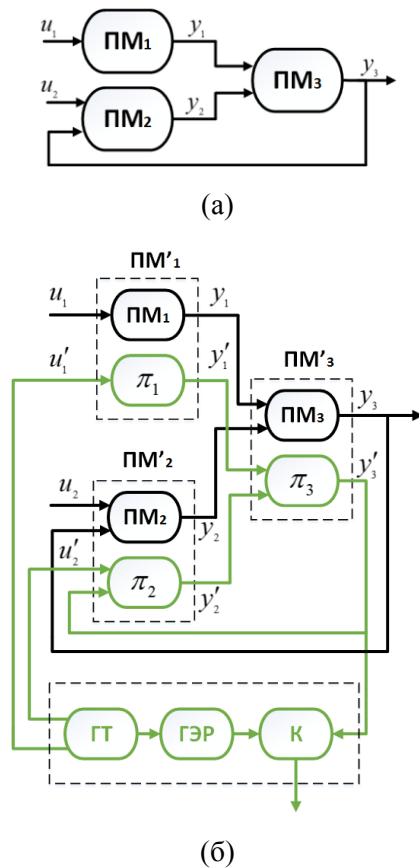


Рисунок 2 – РВС в виде графа междомдульных связей (а), РВС с параллельной моделью и средствами диагностирования (б)

На первом этапе формируется множество вычислительных путей, составляющих покрытие дуг графа междомдульных связей. При этом под вычислительным путем понимаем последовательность срабатывающих ПМ, соединяющую некоторый вход системы с её выходом. Затем с каждым из полученных путей сопоставляется цепь  $l_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ , из такого числа динамических звеньев  $v_i$ ,  $i = \overline{1, n_j}$ , через сколько ПМ проходит данный путь.

На втором этапе формирования модели определяется вид динамических звеньев. При этом учитывается, что искомая динамическая модель системы далее используется для построения тестов и что процедура построения тестов упрощается, если модель системы, во-первых, линейна, а во-вторых, управляема и наблюдаема. Отсюда можно сформулировать требование к звеньям цепей модели. Они должны быть линейны и определены в двоичном поле  $\mathbb{F} = \{0, 1\}$ :

$$\mathbf{x}_{i,j}(k+1) = \mathbf{f}_{i,j} \mathbf{x}_{i,j}(k) + \mathbf{g}_{i,j} \mathbf{u}_{i,j}(k), \quad \mathbf{y}_{i,j}(k) = \mathbf{h}_{i,j} \mathbf{x}_{i,j}(k), \quad i = \overline{1, n_j}, j = \overline{1, m}, \quad (1)$$

Параллельно с этим тестовые информационные слова обрабатываются специальными диагностическими алгоритмами:  $\pi_i$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , реагирующими на события приема/выдачи информации, а результаты их обработки выдаются в составе выходных данных. Поскольку механизм обмена реальными и тестовыми данными в системе является общим (данные передаются в одних и тех же массивах), возникает возможность по наблюдаемым в процессе работы тестовым результатам делать вывод о наличии или отсутствии нарушений в адресации обменов. Заметим, что искажения реальных данных в процессе обмена при сохранении графа информационных связей не входят в класс рассматриваемых нарушений. Таким образом, при тестировании с параллельной моделью проблема заключается в построении алгоритмов обработки тестовых информационных слов в каждом из ПМ, а также в построении по виду этих алгоритмов самих тестов.

Известен алгоритм синтеза параллельной модели РВС, состоящий из двух этапов. На



где  $\mathbf{x}_{i,j}(k) \in \mathbb{F}^n$ ,  $\mathbf{u}_{i,j}(k) \in \mathbb{F}^q$ ,  $\mathbf{y}_{i,j}(k) \in \mathbb{F}^p$  – векторы состояния, входа и выхода соответственно для  $i$ -го звена модели  $j$ -й цепи,  $n$  – размерность вектора состояния,  $q$  – размерность входного вектора,  $p$  – размерность выходного вектора,  $\mathbf{f}_{i,j} \in \mathbb{F}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{g}_{i,j} \in \mathbb{F}^{n \times q}$ ,  $\mathbf{h}_{i,j} \in \mathbb{F}^{p \times n}$  – матрицы динамики, входа и выхода соответственно,  $n_j, m$  – число звеньев в  $j$ -цепи и число цепей в модели системы соответственно. Так как информация передается последовательно от звена к звену, будем считать  $\mathbf{y}_{i,j}(k) = \mathbf{u}_{i+1,j}(k+1)$ , кроме первого звена в цепи, т.к. оно принимает на вход тест от СД. Дополнительно, звенья должны быть таковы, чтобы модель системы была наблюдаемой и управляемой.

Динамическое описание цепи получается по следующим правилам. Предположим, что в каждый момент времени в системе происходит лишь один обмен. На практике это предположение не всегда выполняется, однако, существуют работы, в которых показывается, что это не является препятствием для использования таких моделей при построении тестов. С учетом предположения формируется общий вектор состояния цепи  $\mathbf{x}_j(k)$ , составленный из векторов состояния звеньев (1)  $\mathbf{x}_{i,j}(k)$ ,  $i = \overline{1, n_j}$ , а с помощью блочных матриц  $\mathbf{F}_j(j(k)), \mathbf{G}_j(j(k)), \mathbf{H}_j(j(k))$  описывается перенос информации между ПМ системы, а также между ПМ и СД в каждом  $j(k)$ -м информационном обмене. Для удобства описания свяжем с каждой последовательностью матриц на интервале, равном периоду обработки штатных данных в исходной системе, свою последовательность индексов, множество которых обозначим через  $\Gamma_j = \{\gamma_s\}_{s=1}^{N_j}$ , где количество сеансов обмена  $N_j = n_j + 1$ . Значения последовательностей индексов получаются в результате циклического сдвига начальной последовательности на интервале равном  $N_j$ . Например, при  $N = 3$  имеем множество последовательностей индексов матриц  $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\} = \{1, 2, 3; 2, 3, 1; 3, 1, 2\}$ , которое состоит из трех последовательностей. Тогда для описания модели получим:

$$\mathbf{x}_j(k+1) = \mathbf{F}_j(\gamma_s(j(k)))\mathbf{x}_j(k) + \mathbf{G}_j(\gamma_s(j(k)))\mathbf{u}_j(k), \mathbf{y}_j(k) = \mathbf{H}_j(\gamma_s(j(k)))\mathbf{x}_j(k), \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}_j(k) \in \mathbb{F}^{Nn}$ ,  $\mathbf{u}_j(k) \in \mathbb{F}^{Nq}$ ,  $\mathbf{y}_j(k) \in \mathbb{F}^{Np}$  – векторы состояния, входа и выхода,  $\mathbf{F}_j(\gamma_s(j(k))) \in \mathbb{F}^{Nn \times Nn}$ ,  $\mathbf{G}_j(\gamma_s(j(k))) \in \mathbb{F}^{Nn \times Nq}$ ,  $\mathbf{H}_j(\gamma_s(j(k))) \in \mathbb{F}^{Np \times Nn}$  – матрицы динамики входа и выхода соответственно,  $j(k) = \overline{1, N}$  – счётчик информационных обменов. Матрицы в этих уравнениях зависят от текущего значения счетчика информационных обменов, т.е. модель является нестационарной. Более того, она является периодически нестационарной, т.к. из-за периодичности входного потока процессы обработки данных в системе периодические.

Однако применение такой модели РВС может в некоторых случаях потребовать передачи через каналы обмена большого количества диагностической информации, что не всегда допустимо. Известны работы,

где показана целесообразность обработки нескольких массивов информации одним звеном (слияние вычислительных путей). В диссертации предлагается алгоритм синтеза иерархической диагностической модели, в которой таких звеньев несколько [3, 21]. Алгоритм состоит из трех основных этапов:

1) определить по виду исходного информационного графа распределенной вычислительной системы структуру диагностической модели с независимыми цепями;

2) ввести точки слияния в модель из независимых цепей, сокращая тем самым количество динамических звеньев и, как следствие, объём передаваемой диагностической информации в обеспечение минимума критерия:

$$S^{h^*} = \arg \min_{S^h} (\dim \mathbf{y}_d) \quad (3)$$

где  $S^{h^*}$  – результирующая иерархическая модель со многими точками слияния,  $\mathbf{y}_d = [\mathbf{y}_{\pi_1}^T \quad \mathbf{y}_{\pi_2}^T \quad \dots \quad \mathbf{y}_{\pi_p}^T]^T$  – диагностический вектор, составленный из выходных векторов диагностических алгоритмов,  $P$  – количество диагностических алгоритмов модели, соответствующее количеству программных модулей;

3) задать для каждого динамического звена результирующей иерархической структуры линейную динамическую систему (1), удовлетворяющую условиям наблюдаемости и управляемости.

Псевдокод алгоритма решения задачи минимизации диагностического вектора путем увеличения числа точек слияния представлен на рисунке 3а. На рисунке 3б представлена процедура объединения двух вершин (звеньев) в случае обнаружения точки слияния.

```

1: procedure CHAINMERGE(L, M, P)
2:   T ← MakeHash(|P|, 0)
3:   M ← MakeVector()
4:   key ← 0
5:   node ← 0
6:   for all l ∈ L do
7:     key ← HashSearch(T, Tail(l))
8:     if T[key] ≠ 0 then
9:       node ← NodeMerge(T[key], Tail(l))
10:      PushBack(M, node)
11:     else
12:       HashInsert(T, Tail(l))
13:     end if
14:   end for
15:   return |L| - |M| - 1
16: end procedure

```

(a)

```

17: procedure NODEMERGE(N1, N2)
18:   mergednode ← 0
19:   if N1.listnum ≠ N2.listnum then
20:     if N1.nodenum == N2.nodenum then
21:       for all prev ∈ N1.prev[] do
22:         if prev.nodenum == N2.prev.nodenum then
23:           mergednode ← NodeMerge(prev, N2.prev)
24:         end if
25:       end for
26:     end if
27:     N1.prev[] ← PushBack(N2.prev)
28:     N2.prev.next ← N1
29:     DeleteNodes(N2)
30:     mergednode ← N1
31:   return mergednode
32: end if
33: end if
34: end procedure

```

(б)

Рисунок 3 – Алгоритм слияния цепей (а), процедура объединения двух вершин разных цепей (б).

В диссертации с использованием математического приема, состоящего в переходе к стационарной модели  $\hat{S}^h$ , сформулированы и доказаны достаточные условия наблюдаемости и управляемости полученной иерархической диагностической динамической модели  $S^h$  [2, 12, 14, 17]:

Иерархическая периодически нестационарная модель  $S^h$ , включающая  $\mu$  точек слияния, наблюдаема и управляема, если

- 1) все ее матрицы динамики неособенные,
- 2) для стационарной модели  $\widehat{S}^h$  для любой  $\nu$ -й точки слияния  $\nu = \overline{1, \mu}$  в звене  $M_\nu^h$  наблюдаемых и управляемых скалярных подсистем из множества  $\{\widehat{S}_k \mid k = \overline{1, q}\}$  взаимно просты все многочлены из следующего множества: характеристические многочлены  $\{\varphi_k \mid k = \overline{1, q}\}$  подсистем, характеристический многочлен  $\varphi_{f_\nu}$  и многочлены  $\{c_k \mid k = \overline{1, q}\}$  числителей передаточных функций  $\{J_k \mid k = \overline{1, q}\}$  звена слияния  $M_\nu^h$ .

Кроме моделей системы, ориентированных на использование при ТД бортовых РВС, в настоящей главе проанализированы интервальные модели систем, используемые далее для решения второй задачи, а именно, ФД бортовых СУ в условиях наличия неопределенностей в их моделях. Теоретически решение может быть получено с использованием наблюдателей состояния Люенбергера, однако, как будет показано в главе 3, это решение будет недостаточно эффективным. Предпочтительным окажется использование интервальных наблюдателей, формирующих интервал, которому принадлежит в текущий момент времени вектор состояния диагностируемой системы [9, 10].

Рассмотрим линейную стационарную динамическую систему, в поле вещественных чисел  $\mathbb{R}$ :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t) + \mathbf{d}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^q$ ,  $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^p$  – вектора состояния входа и выхода соответственно,  $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{n \times q}$ ,  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{p \times n}$  – матрицы динамики, входа и выхода соответственно,  $\mathbf{d}(t)$  – вектор возмущающих воздействий на динамику системы,  $\mathbf{v}(t)$  – аддитивные шумы измерений. Предполагается, что все неопределенности принадлежат известным интервалам.

Допущение 1. Пусть  $\mathbf{x}(0) \in [\underline{\mathbf{x}}_0, \overline{\mathbf{x}}_0]$  для некоторых известных  $\underline{\mathbf{x}}_0, \overline{\mathbf{x}}_0 \in \mathbb{R}^n$  и пусть также две функции  $\underline{\mathbf{d}}(t)$ ,  $\overline{\mathbf{d}}(t)$  и константа  $V > 0$  заданы таким образом, что:

$$\underline{\mathbf{d}}(t) \leq \mathbf{d}(t) \leq \overline{\mathbf{d}}(t), \quad |\mathbf{v}(t)| \leq V \quad \forall t \geq 0.$$

Таким образом, мы можем задать следующие интервалы для неопределенностей в системе (4):  $[\underline{\mathbf{x}}_0, \overline{\mathbf{x}}_0], [\underline{\mathbf{d}}(t), \overline{\mathbf{d}}(t)], [-V, V]$ . Используя данные интервалы, а также информацию о выходе системы  $\mathbf{y}(t)$  требуется рассчитать такие оценки  $\underline{\mathbf{x}}(t), \overline{\mathbf{x}}(t) \in \mathbb{R}^n$ , чтобы для  $\forall t \geq 0$  выполнялось условие:

$$\underline{\mathbf{x}}(t) \leq \mathbf{x}(t) \leq \overline{\mathbf{x}}(t) \quad (5)$$

Решить поставленную задачу можно с помощью интервального наблюдателя:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{F}\underline{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{L}[\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}\underline{\mathbf{x}}(t)] - |\mathbf{L}|\mathbf{E}\mathbf{V} + \mathbf{G}\mathbf{u}(t) + \underline{\mathbf{d}}(t) \\ \dot{\overline{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{F}\overline{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{L}[\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}\overline{\mathbf{x}}(t)] + |\mathbf{L}|\mathbf{E}\mathbf{V} + \mathbf{G}\mathbf{u}(t) + \overline{\mathbf{d}}(t)\end{aligned}\quad (6)$$

где  $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{n \times p}$  – коэффициент усиления наблюдателя.

Известно, что при допущении 1 условие (5) выполняется для системы (4) с интервальным наблюдателем (6) при условии, что матрица  $\mathbf{F} - \mathbf{L}\mathbf{H}$  – метцлерова. В дополнение наблюдатель устойчив, если матрица  $\mathbf{F} - \mathbf{L}\mathbf{H}$  – гурвицева. Этот факт составляет основу процедур синтеза интервальных наблюдателей.

**В третье главе** на основе вышеописанных моделей предлагаются решения для обеих задач, рассматриваемых в настоящей диссертации.

Рассмотрим задачу ТД в случае, когда разработчик при построении теста для системы определяет класс отказов как всевозможные искажения матриц её модели (нарушения в адресации обменов в случае, когда модель ДС описывает сеансы приема/передачи информации). При этом будем предполагать, что система наблюдаема и управляема и что любой отказ из рассматриваемого класса приводит лишь к искажению матриц ДС, но не выводит ее из класса линейных.

Для дискретной линейной стационарной динамической системы обсуждаемый тест будет состоять из двух частей  $\mathbf{U}_1$  и  $\mathbf{U}_2$ . Обе части строятся по описанию модели исправной системы. Рассмотрим первую часть, под воздействием которой модель последовательно проходит через  $n$  состояний  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^n$ . Пусть эти состояния образуют базис пространства состояний модели. После установки в каждое из этих состояний модель находится в свободном движении (вход равен нулю) на протяжении  $n$  тактов, т.е.  $\mathbf{U}_1$  имеет вид:

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{u}_1^* 0^n \mathbf{u}_2^* 0^n \dots \mathbf{u}_n^* 0^n,$$

где  $\mathbf{u}_i^*$  – установочная последовательность в состояние  $\mathbf{x}_i$ ,  $0^n$  – входная последовательность из  $n$  нулей. Последовательность  $\mathbf{U}_1$  существует, т.к. модель ДС управляема.

Вторая часть теста  $\mathbf{U}_2$  содержит  $m$  фрагментов (по числу входов), каждый из которых состоит из входной последовательности  $\mathbf{u}_i$  и последовательности  $0^n$ , т.е.  $\mathbf{U}_2$  имеет вид:

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{u}_1 0^n \mathbf{u}_2 0^n \dots \mathbf{u}_m 0^n,$$

В свою очередь, вектор  $\mathbf{u}_i$  состоит из нулевых компонент, кроме одной, равной единице. При этом  $\mathbf{u}_i$  содержит единицу в  $i$ -м разряде.

Известно, что любое неэквивалентное (приводящее к нарушению отображения вход-выход) искажение матриц  $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{H}$  обнаруживается тестом

$$\mathbf{U}^s = \mathbf{U}_1 \mathbf{U}_2 \quad (7)$$

Далее с опорой на тест дискретной линейной стационарной динамической системы рассматривается алгоритм построения теста для дискретной линейной периодически нестационарной динамической системы (2).

Сразу следует отметить, что, если в стационарном случае диагностический эксперимент был направлен на проверку трех матриц  $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{H}$ , то в данном случае проверяемых матриц в  $N$  раз больше, а, значит, можно предположить, что и искомый тест окажется в  $N$  раз длиннее. Тест должен включать установочные и транслирующие последовательности. При их определении будут использоваться свойства управляемости и наблюдаемости диагностируемой системы. В диссертации для такой системы описывается процедура построения теста и доказываемая ее корректность [1, 6, 7, 13, 15, 18, 19]. Класс отказов сохраняется - всевозможные искажения матриц модели (2), при которых неисправная система неэквивалентна исправной. Тест состоит из  $N$  фрагментов:

$$\mathbf{U}^{ns} = \mathbf{U}_{\gamma_1} \mathbf{U}_{\gamma_2} \dots \mathbf{U}_{\gamma_N}, \quad (8)$$

каждый из которых включает две характерные части:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{1\gamma_s} &= \mathbf{u}_{1,\gamma_s}^* 0^{nN} \mathbf{u}_{2,\gamma_s}^* 0^{nN} \dots \mathbf{u}_{n,\gamma_s}^* 0^{nN}, \\ \mathbf{U}_{2\gamma_s} &= \mathbf{u}_{1,\gamma_s}^* 0^{nN} \mathbf{u}_{2,\gamma_s}^* 0^{nN} \dots \mathbf{u}_{m,\gamma_s}^* 0^{nN}. \end{aligned}$$

В первой части  $\mathbf{U}_{1\gamma_s}$  всех фрагментов система при последовательности индексов матриц  $\gamma_s$  проходит в пространстве состояний через состояния некоторого выбранного базиса  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^n$ . Для каждого состояния  $\mathbf{x}_i$  в фрагменте предусмотрены установочная последовательность  $\{\mathbf{u}_{i,\gamma_s}^*\}_{i=1}^n$  длиной, кратной  $N$ , и интервал свободного движения при последовательности индексов матриц  $\gamma_s$ , когда на вход модели подается последовательность из  $nN$  нулевых векторов, обозначенные как  $0^{nN}$ . Благодаря тому, что длины установочных последовательностей кратны  $N$ , все интервалы свободного движения система проходит при последовательности индексов матриц  $\gamma_s$ . Во второй части  $\mathbf{U}_{2\gamma_s}$  всех фрагментов на вход модели последовательно подаются векторы  $\{\mathbf{u}_{i,\gamma_s}^*\}_{i=1}^m$ , принадлежащие некоторому базису пространства входных векторов. После каждого вектора модель находится в свободном движении на  $nN$  тактах при последовательности индексов матриц  $\gamma_s$ .

**Утверждение 2.** Если периодически нестационарная модель (2) полностью наблюдаема и управляема, то для нее существует входная последовательность  $\mathbf{U}^{ns}$  (8), обнаруживающая все неэквивалентные искажения матриц  $\{\mathbf{F}(\gamma_s(1)), \mathbf{G}(\gamma_s(1)), \mathbf{H}(\gamma_s(1))\}_{s=1}^N$ , не увеличивающие размерность системы и не выводящие ее из класса линейных.

В диссертации доказываемая, что в отношении периодически нестационарной модели (2) также может быть эффективно применен тест (7).

**Утверждение 3.** Если периодически нестационарная модель (2) полностью наблюдаема и управляема, то для нее существует входная

последовательность  $\mathbf{U}^s$  (7), обнаруживающая все неэквивалентные искажения матриц  $\{\mathbf{F}(\gamma_s(1)), \mathbf{G}(\gamma_s(1)), \mathbf{H}(\gamma_s(1))\}_{s=1}^N$ , которые не увеличивают размерность системы и не выводят ее из класса линейных.

В заключительных параграфах главы 3 рассматриваются задачи обнаружения и поиска отказов в динамических системах в условиях наличия неопределенностей в модели ДС с использованием интервальных наблюдателей. Исследование проводилось для случая перемежающихся параметрических отказов, характерных для элементов систем управления, описываемых с помощью линейных стационарных динамических моделей (4). Кроме того, исследованию подлежали зависимости ошибок диагностирования от уровней отказа и неопределенностей модели диагностируемой системы.

Для наглядности рассмотрение иллюстрировалось на конкретном примере – модели двигателя постоянного тока, который является неотъемлемой частью большинства систем управления. Для оценки эффективности использования интервальной модели (4) проводилось сравнение с результатами диагностирования с использованием наблюдателя Люенбергера в аналогичных условиях. Динамическая модель двигателя постоянного тока описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка и в пространстве состояний имеет в вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ I(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{k}{J} \\ -\frac{k}{L_p} & -\frac{R}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ I(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_p} \end{bmatrix} U_{ctrl}(t) + \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ I(t) \end{bmatrix},$$

где  $\theta(t)$  – угол поворота ротора двигателя,  $J$  – приведенный момент инерции ротора и нагрузки (с учетом возможного включения редуктора),  $b$  – коэффициент динамической вязкости,  $k_m$  – коэффициент крутящего момента двигателя,  $I(t)$  – сила тока,  $L_p$  – индуктивность обмотки ротора,  $R = R_p + R_n$  – полное сопротивление цепи, которое складывается из сопротивления обмотки ротора ( $R_p$ ) и сопротивления всех остальных проводников в цепи ( $R_n$ ),  $U_{ctrl}(t)$  – ЭДС источника тока (управляющее напряжение),  $k_e$  – коэффициент обратной ЭДС,  $y(t)$  – выход системы, соответствующих скорости вращения ротора двигателя,  $\mathbf{d}(t) = [d_1(t) \ d_2(t)]^T$  – внешнее возмущающее воздействие. Как правило, на практике считают  $k_m = k_e = k$  и называют конструктивной постоянной двигателя.

Пусть неизвестные начальные условия системы и внешнее возмущающее воздействие принадлежат заданным интервалам значений:

$$\underline{\mathbf{x}}_0 \leq \mathbf{x}(0) \leq \bar{\mathbf{x}}_0, \underline{\mathbf{d}}(t) \leq \mathbf{d}(t) \leq \bar{\mathbf{d}}(t), \forall t \geq 0.$$

Предположим, что возмущающее воздействие представляет собой суперпозицию гармонических функций с аддитивным гауссовским белым шумом  $w(t)$ , ограниченным в полосе частот:

$$\mathbf{d}(t) = \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \sin(\omega_{11}t) \\ B_1 \cos(\omega_{12}t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_2 \sin(\omega_{22}t) \\ B_2 \cos(\omega_{22}t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

В качестве отказа рассмотрим перемежающийся (периодический с восстановлением в номинальное состояние) параметрический отказ, заключающийся в увеличении коэффициента  $-\frac{R}{L_p}$  в два раза.

На рисунке 4 представлены результаты моделирования. Верхний график рисунке 4а отражают динамику появления отказа в системе (0 – отказ отсутствует, 1 – отказ присутствует). На нижних графиках изображена невязка между выходным сигналом диагностируемой системы и выходным сигналом наблюдателя:

$$\underline{\nu}(t) = y(t) - y_n(t) \quad (11)$$

На рисунке 4а представлена невязка для наблюдателя Люенбергера, а на рисунке 4б для интервального наблюдателя, которая формируется как полусумма невязок верхней и нижней границ:

$$\underline{\nu}(t) = \frac{\bar{\nu}(t) + \underline{\nu}(t)}{2} \quad (12)$$

где  $\bar{\nu}(t)$  и  $\underline{\nu}(t)$  рассчитываются с использованием выражения (11).

Из приведенных результатов моделирования можно сделать вывод, что при использовании наблюдателя Люенбергера формируемая невязка нечувствительна к моделируемому отказу, что делает его использование в СД неэффективным. В противоположность этой ситуации невязка интервального наблюдателя чувствительна к отказу, что позволяет использовать ее в качестве информационного сигнала при принятии решения об отказе.

Далее в работе исследуется процедура синтеза средств ФД, предназначенных для поиска отказов в СУ. При этом средства ФД представляются в виде банка наблюдателей. В результате формируется вектор невязок банка наблюдателей  $\mathbf{v}(t) = [\nu_1(t) \ \nu_2(t) \ \dots \ \nu_N(t)]^T$ ,  $N$  – количество наблюдателей в банке. Для того чтобы принять решение о месте отказа по вектору невязок, был использован алгоритм на основе теории нечетких множеств,

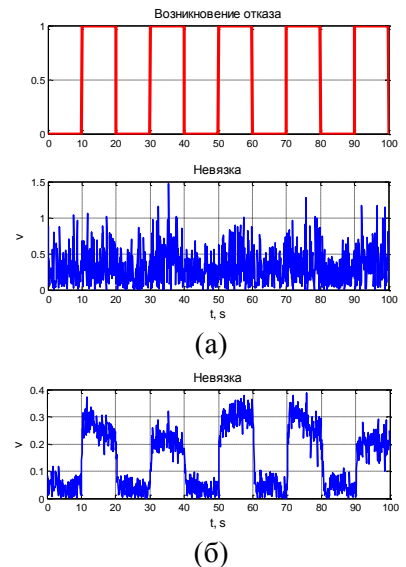


Рисунок 4 – Невязка между выходным сигналом системы и выходом наблюдателя Люенбергера (а), усредненная невязка между выходным сигналом системы и выходными сигналами интервального наблюдателя (б).

предложенный в [5]. Основной особенностью алгоритма является предположение о том, что между работоспособным и неработоспособным техническими состояниями (ТС) системы отсутствует четкая граница. Поэтому в результате работы нечеткого алгоритма принятия решения об отказе формируются нормированные коэффициенты уверенности (принадлежности к одну из ТС).

Количественный анализ эффективности решения задачи поиска отказов проводился путем расчёта вероятности ошибки диагностирования (в %):

$$\varepsilon = \frac{T_{\varepsilon}}{T_{\text{общ}}}, \quad (13)$$

где  $T_{\varepsilon} = T_I + T_{II}$  – суммарное время, в течение которого средства диагностирования ошибаются,  $T_I$  – суммарное время возникновения ошибок I-рода (ложные срабатывания),  $T_{II}$  – суммарное время возникновения ошибок II-рода (пропуск отказа),  $T_{\text{общ}}$  – суммарное время функционирования системы (время моделирования/время работы системы). В диссертации введено правило определения времени возникновения ошибок первого и второго рода с использованием нормированных коэффициентов уверенности.

**В четвертой главе** диссертации представлены результаты практической апробации на примере навигационного комплекса (НК) АНПА, разработанного в рамках инициативной работы в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Задачи диагностирования решались на различных уровнях иерархии компонентов рассматриваемого комплекса с использованием техник ТД и ФД [8, 20, 22]. Для решения задач ТД применялась разработанная в рамках исследовательской работы инструментальная среда, позволяющая автоматизировать процедуры синтеза тестов и эталонных реакций системы [4, 16]. Обнаружение отказов с использованием методов ТД производилось в бортовой РВС НК, которая аппаратно представляет собой совокупность вычислителей приборов (бесплатформенной инерциальной навигационной системы, гравиметра, эхолота, относительного лага, устройства управления, средств обсервации с использованием геофизических полей (ГФП) Земли и гидроакустической связи) и средств цифровой обработки информации (СЦОИ).

Исходной информацией для решения задачи ТД является информационный граф ПО НК (рисунок 5). На рисунке изображены вычислительные пути, обеспечивающие передачу данных между конкретными участниками информационного взаимодействия. На первом этапе по виду информационного графа синтезируется параллельная иерархическая модель, описанная во второй главе. Далее по этой модели строятся тестовые входные и эталонные выходные последовательности. В таблице 1 представлен пример таких последовательностей для вычислительного пути (цепи их диагностических модулей) длиной 5, отражающего передачу координат местоположения АНПА от БИНС в аппаратуру гидроакустической навигационной системы (ГАНС).



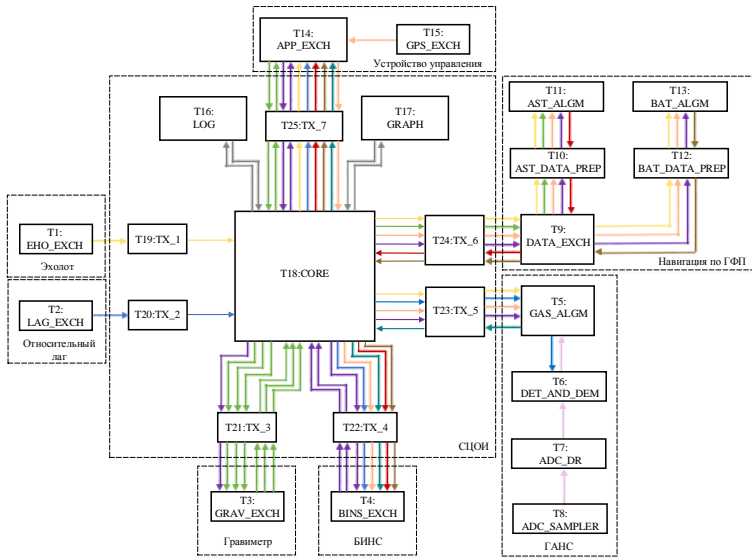


Рисунок 5 – Информационный граф ПО НК

Общее количество вычислительных путей составило 36, при минимальной длине цепи, равной 2 и максимальной, равной 7. Для каждого из них были сформированы соответствующие тестовые и эталонные последовательности, обеспечивающие 100% покрытие информационного графа ПО и позволяющие обнаруживать в бортовой РВС АНПА отказы, связанные с нарушением в

адресации межмодульных обменов.

Таблица 1 – Пример установочной последовательности и эталонной реакции модели (цепь длиной 5)

№	Установочная последовательность	Эталонная выходная реакция
$u_1^* 0^{15}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Оценка эффективности решения задачи поиска отказов с использованием методов ФД проводилась на примере косвенно стабилизированной платформы гравиметра из состава рассматриваемого комплекса. Исследование проводилось применительно к одной из осей стабилизации, а именно, по оси наружного кольца в предположении отсутствия взаимного влияния поворотов колец подвеса. Удержание платформы в горизонте по углу бортовой качки осуществлялось с помощью безредукторной следящей системы (БСС).

Для удобства анализа и моделирования БСС, модель разомкнутой системы (без учета ПИД-регулятора) была представлена в пространстве состояний:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \alpha_2(t) \\ \dot{\alpha}_2(t) \\ \beta(t) \\ \dot{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{mn}}{J} & -\frac{(K_{mp} + S_o)}{J} & 0 & \frac{K_o}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_m T_e} & -\frac{1}{T_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2(t) \\ \dot{\alpha}_2(t) \\ \beta(t) \\ \dot{\beta}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_y}{T_m T_e} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} d_1(t) \\ 0 \\ d_2(t) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$y(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \alpha_2(t) \\ \dot{\alpha}_2(t) \\ \beta(t) \\ \dot{\beta}(t) \end{bmatrix} + v(t),$$

где  $\alpha_2(t) = \theta_k(t) - \alpha(t)$  – абсолютный угол поворота платформы относительно горизонта,  $\theta_k(t)$  – угол качки,  $\alpha(t)$  – ошибка стабилизации,  $\beta(t)$  – угол поворота ротора моментного двигателя,  $J$  – момент инерции платформы,  $K_{тр}$  – коэффициент сухого трения на оси стабилизации,  $K_o$  – коэффициент крутящего момента двигателя,  $S_o$  – коэффициент вязкого трения на оси вращения двигателя,  $T_m$  – электромеханическая постоянная времени двигателя,  $T_e$  – электромагнитная постоянная времени обмотки управления моментного двигателя,  $K_y$  – коэффициент усиления по напряжению,  $u$  – напряжение управления двигателем,  $\mathbf{d}(t) = [d_1(t) \ 0 \ d_2(t) \ 0]$  – вектор возмущающих воздействий, компоненты которого представлены как суперпозиция гармонических сигналов разной частоты,  $\nu(t)$  – аддитивный гауссовский белый шум, ограниченный в полосе частот.

Для получения результирующей характеристики эффективности решения задачи поиска отказов моделирование проводилось при разных уровнях внешнего возмущения (10), с постепенным увеличением амплитуды гармоник.

В качестве аппаратного отказа, рассматривался параметрический перемежающийся отказ, связанный с изменением параметров сухого трения в системе. Как и в случае с внешним возмущением, моделирование проводилось при разных уровнях отказа, выделив три градации: 10%, 50%, 100% от номинального значения диагностируемого параметра соответственно.

Средства диагностирования как на основе наблюдателей Люенбергера, так и на основе интервальных наблюдателей состояли из двух наблюдателей – один с номинальными параметрами модели (14), другой с параметрами отказа.

На рисунке 6 представлены результаты сравнительного анализа эффективности решения задачи поиска отказов в безредукторной следящей системе косвенно стабилизированной платформы. На графиках приведены значения вероятности ошибки диагностирования (в процентах) для банка наблюдателей Люенбергера (штрихпунктирные линии) и для банка интервальных наблюдателей (сплошные линии) в зависимости от

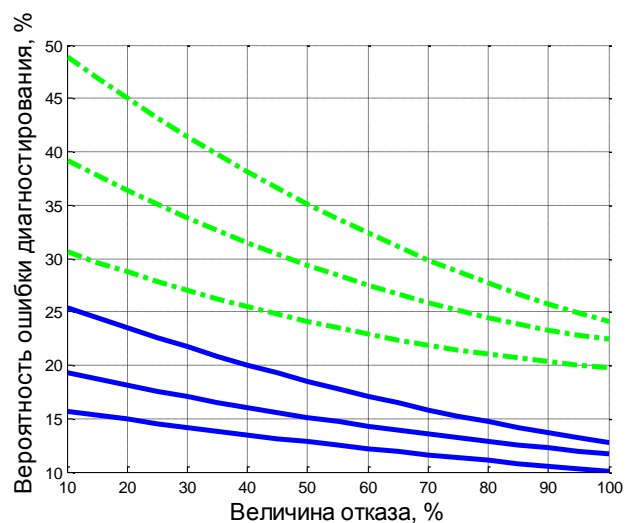


Рисунок 6 – График зависимости вероятности ошибки диагностирования от величины отказа и величины внешнего возмущения, сплошные линии графиков – банк интервальных наблюдателей, штрихпунктирные линии графиков – банк наблюдателей Люенбергера.

уровня возмущающего воздействия (увеличивается по оси ординат) и уровня отказа (увеличивается по оси абсцисс). По графикам можно сделать вывод о том, что уровень неопределенности в исходной системе непосредственно влияет на качество решения задачи поиска отказов. Значение вероятности ошибки диагностирования уменьшается с увеличением уровня отказа, что естественно, так как отклонения диагностируемых параметров системы в большей степени наблюдаются по выходному сигналу системы. Кроме того, из графиков видно, что эффективность банка интервальных наблюдателей для всех проведенных экспериментов выше, даже при максимальном уровне неопределенностей и минимальном уровне отказа.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В настоящей диссертационной работе рассмотрены теоретические и практические аспекты проблемы диагностирования бортовых систем обработки информации и управления. При этом получены следующие результаты:

1. Предложен алгоритм синтеза наблюдаемой и управляемой иерархической динамической периодически нестационарной модели для бортовых распределенных вычислительных систем реального времени, которая позволяет сокращать объем диагностической информации передаваемой по каналам обмена.

2. Сформулированы достаточные условия наблюдаемости и управляемости иерархической диагностической динамической модели для бортовых распределенных вычислительных систем реального времени.

3. Предложен алгоритм синтеза теста для бортовых распределенных вычислительных систем реального времени, который обнаруживает любые нарушения адресации в межмодульных обменах РВС.

4. Предложен и исследован алгоритм функционального диагностирования бортовых систем управления в условиях наличия в их моделях неопределенностей, использующий банк интервальных наблюдателей и нечеткие правила принятия решения об отказе для решения задачи поиска отказов.

5. Осуществлена апробация полученных результатов при разработке навигационного комплекса автономного необитаемого подводного аппарата в рамках инициативной работы в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», подтвердившая эффективность предложенных решений.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Лукоянов Е. В. Тестовое диагностирование адресаций информационных обменов в вычислительных системах с использованием параллельной модели / А. М. Грузликов, Н. В. Колесов, Е. В. Лукоянов, М. В. Толмачева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2018. – № 3. – С. 76-89.
2. Лукоянов Е. В. Диагностическая модель для распределенной вычислительной системы реального времени / А. М. Грузликов, Н. В. Колесов, Е. В. Лукоянов, М. В. Толмачева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 5. – С. 44-55.
3. Лукоянов Е.В. Синтез иерархической диагностической модели потоковой вычислительной системы реального времени / Е. В. Лукоянов, А. М. Грузликов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 677–682.
4. Лукоянов Е. В. Автоматизация построения средств диагностирования для потоковой вычислительной системы реального времени / Е. В. Лукоянов, А. М. Грузликов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1. № 1. С. 94–100.

### Публикации, входящие в международные базы цитирования

#### Scopus и WoS:

5. Lukoyanov E. V. Using fuzzy interacting observers for fault diagnosis in systems with parametric uncertainty / N. V. Kolesov, A. M. Gruzlikov, E. V. Lukoyanov // Procedia Computer Science. – 2017. – Т. 103. – С. 499-504.
6. Lukoyanov E. V. Test-based diagnosis of distributed computer system using a time-varying model / N. V. Kolesov, A. M. Gruzlikov, E. V. Lukoyanov, M.V. Tolmacheva // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Т. 51. – №. 24. – С. 1075-1082.
7. Lukoyanov E. V. Testing Configurations of Inhomogeneous Distributed Control Systems / N. V. Kolesov, A. M. Gruzlikov, E. V. Lukoyanov, M.V. Tolmacheva // 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS). – IEEE. – С. 231-232.
8. Lukoyanov E. V. Functional and test diagnosis of onboard systems using dynamic models / E. V. Lukoyanov, A. M. Gruzlikov, N. V. Kolesov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 984. – №. 1. – С. 012035.

### Другие публикации и материалы конференций, входящие в базу цитирования РИНЦ:

9. Лукоянов Е. В. Применение интервальных наблюдателей при диагностировании динамических систем/ Е. В. Лукоянов // Навигация и управление движением: материалы XVIII конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 15–18 марта 2016. – Санкт-Петербург: "Концерн "ЦНИИ" Электроприбор", 2016. – С. 482-487.
10. Лукоянов Е. В. Поиск отказов в динамических системах с использованием банка интервальных наблюдателей / Е. В. Лукоянов, А. М. Грузликов // Навигация и управление движением: материалы XIX конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 14–17 марта 2017 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "ЦНИИ" Электроприбор", 2017. – С. 199-201.
11. Lukoyanov E. V. Active diagnosis of a discrete event systems / A. M. Gruzlikov, N. V. Kolesov, E. V. Lukoyanov // International Workshop Navigation and Motion Control 2017: proceedings, St. Petersburg, 02–06 октября 2017 года. – St. Petersburg: "Концерн "ЦНИИ" Электроприбор", 2017. – 99 p.
12. Лукоянов Е. В. Сетединамическая модель распределенной вычислительной системы реального времени / Е. В. Лукоянов, А. М. Грузликов // Навигация и управление движением: Материалы XX конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 20–23 марта 2018 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "ЦНИИ" Электроприбор", 2018. – С. 416-418.
13. Лукоянов Е. В. Высокоуровневое тестирование распределенной вычислительной системы реального времени / Е. В. Лукоянов, А. М. Грузликов // Навигация и управление движением:

Материалы XX конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 20–23 марта 2018 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "ЦНИИ" Электроприбор", 2018. – С. 419-421.

14.Лукоянов Е. В. Сетединамическая диагностическая модель для распределенной вычислительной системы / А. М. Грузликов, Н. В. Колесов, Е. В. Лукоянов, М. В. Толмачева // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова, Санкт-Петербург, 02–04 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2018. – С. 290-299.

15.Лукоянов Е. В. Построение сокращенного теста для распределенной вычислительной системы / А. М. Грузликов, Н. В. Колесов, Е. В. Лукоянов, М. В. Толмачева // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова, Санкт-Петербург, 02–04 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2018. – С. 300-309.

16.Лукоянов Е. В. Автоматизация процедуры построения тестов для распределенной вычислительной системы реального времени / Е. В. Лукоянов, А. М. Грузликов // Навигация и управление движением: Материалы XXI конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 19–22 марта 2019 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2019. – С. 242-244.

17.Лукоянов Е. В. Синтез наблюдаемой и управляемой параллельной модели для диагностирования распределенной системы / А. М. Грузликов, Н. В. Колесов, Е. В. Лукоянов, М. В. Толмачева // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва, 17–20 июня 2019 года. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 2861-2865.

18.Лукоянов Е. В. Тестирование конфигураций распределенной вычислительной системы / А. М. Грузликов, Н. В. Колесов, Е. В. Лукоянов, М. В. Толмачева // XII Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019): материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019): в 4 томах, Дивноморское, Геленджик, 23–28 сентября 2019 года. – Дивноморское, Геленджик: Южный федеральный университет, 2019. – С. 46-49.

19.Лукоянов Е. В. Тестирование конфигураций неоднородных распределенных вычислительных систем / А. М. Грузликов, Н. В. Колесов, Е. В. Лукоянов, М. В. Толмачева // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2019. – Т. 1. – С. 295-296.

20.Лукоянов Е. В. Поиск отказов в системах подводного аппарата с использованием динамических моделей / Е. В. Лукоянов // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2019. – № 8. – С. 311-316.

21.Лукоянов Е. В. Алгоритм синтеза иерархической модели распределенной вычислительной системы / Е. В. Лукоянов, А. М. Грузликов // Навигация и управление движением: Материалы XXII конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 17–20 марта 2020 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2020. – С. 339-341.

22.Лукоянов Е. В. Диагностирование бортовых вычислительных и управляющих систем с использованием динамических моделей / Е. В. Лукоянов, А. М. Грузликов, Н. В. Колесов // Навигация и управление движением: сборник тезисов докладов Международного семинара, Самара, 28 сентября – 02 октября 2020 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2020. – С. 122-125.