

На правах рукописи



КЛЕЙМАН Лев Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

2.3.2 – Вычислительные системы и их элементы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена на кафедре «Автоматика и телемеханика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **ФРЕЙМАН Владимир Исаакович**
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Автоматика и телемеханика», профессор

Официальные оппоненты: **НАДЕЕВ Адель Фирадович**
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», директор Института радиоэлектроники и телекоммуникаций

РОМАНЦОВА Наталия Владимировна
кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра «Информационно-измерительные системы и технологии», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «14» октября 2022 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.14 по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат диссертации разослан «8» июля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д ПНИПУ.05.14
доктор технических наук, доцент



Фреyman
Владимир Исаакович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что влияние вычислительных систем на показатели эффективности технологических и организационных процессов в различных сферах экономики и производства постоянно усиливается. Для диверсификации применения вычислительных систем, в том числе и в объектах критической инфраструктуры, необходима активизация политики импортозамещения. В результате расширяются возможности для более широкого и эффективного использования отечественного конкурентоспособного математического, технического, информационного, программного обеспечения вычислительных систем и их элементов.

Современные вычислительные системы являются сложными (большое количество компонентов и связей между ними), гетерогенными и мультивендорными. Их основными элементами являются высокопроизводительные процессорные устройства, специализированные большие интегральные схемы (СБИС), устройства с перестраиваемой логикой (например, ПЛИС) и т.п. Они описываются большим количеством различных характеристик, каждая из которых влияет как на их собственные показатели надежности, так и на интегральные показатели всей вычислительной системы. Одним из наиболее эффективных инструментов обеспечения заданных высоких требований к надежности и качеству функционирования является математический аппарат и методы технической диагностики.

Эффективность применения вычислительных систем во многом обуславливает обеспечение заданного качества функционирования тех процессов, информационно-технической платформой которых они являются. Для этого необходимо разрабатывать и применять многофункциональные и высокопроизводительные системы диагностирования. Как следствие, возникает *противоречие* – усложнение объектов диагностирования и самой системы диагностики приводит к увеличению объемов передачи и сложности обработки диагностической информации, что снижает эффективность взаимодействия элементов, приводит к их перегрузке, снижает время автономной работы, ухудшает другие показатели. Поэтому актуальной задачей становится разработка и реализация методов диагностирования вычислительных систем и их элементов, не снижающих, а улучшающих их качественные и эксплуатационные характеристики.

Степень научной разработанности проблемы. Подходы к решению проблемы качественного функционирования систем и их элементов широко представлены в работах отечественных и зарубежных ученых в области технической диагностики и теории надежности. Можно выделить монографии, научные статьи и публикации Пархоменко П.П., Каравая М.Ф., Согомоняна Е.С., Кона Е.Л., Тюрина С.Ф., Сагунова В.И., Ломакиной Л.С., Гурова С.В., Шишмарева В.Ю., Половко А.М., Verbruggen H., Tzafestas S., Zanni E., Jung D. При этом сохраняют ак-

туальность проблемы разработки и исследования новых диагностических моделей вычислительных систем и их элементов для специфических условий эксплуатации таких систем, учитывающих также особенности различных этапов диагностирования.

Вопросами улучшения показателей надежности вычислительных систем и их элементов путем реализации для них систем диагностирования занимались такие ученые, как Ведешенков В.А., Аминев Д.А., Дмитриев Ю.К., Nakimi S.L., Yang C.L., Masson G.M., Kim W., Braun J.E., Li X., Dowdeswell B. В работах этих ученых рассматриваются различные методы повышения надежности вычислительных систем, основным из которых является использование методов и инструментов встроенного контроля. В этих работах описываются методы и алгоритмы, позволяющие проводить тестирование элементов вычислительных систем с обнаружением и поиском неисправностей, прогнозированием изменений технического состояния. Большинство работ по данной теме рассматривают ошибки диагностирования и проблемы в канале передаче данных как причину для реконфигурации системы диагностирования. Это делает актуальной задачу принятия в расчёт фактора технического состояния элементов как причины для проведения реконфигурации встроенной системы тестового диагностирования.

В работах отечественных ученых Подиновского В.В., Нелюбина А.П., Потапова М.А., Фреймана В.И., а также зарубежных исследователей Edwards W., Varron F.H., Figuera J., Greko S., Ehrgott M., рассматриваются методики принятия решений в многокритериальных задачах. Развитием направления их научных исследований является разработка и анализ методики определения характеристик работоспособности элементов вычислительных систем.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является улучшение эксплуатационно-технических показателей вычислительных систем и их элементов на основе эффективного применения системы встроенного диагностирования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Аналитический обзор и анализ моделей, методов и инструментов встроенного диагностирования в вычислительных системах различных конфигураций, технологий и условий эксплуатации, анализ их недостатков, обоснование актуальности проводимых исследований.
2. Разработка диагностической модели элементов вычислительных систем и математической модели встроенной системы диагностирования.
3. Создание методов определения основных характеристик разработанных математических и диагностических моделей.
4. Разработка метода динамического распределения диагностических задач между элементами встроенной системы диагностирования.
5. Апробация разработанных моделей и методов, реализованных в структуре информационного и программного обеспечения управляющих и коммуникационных элементов вычислительных систем.

Объект исследования – вычислительная система и её элементы, используемые в различных условиях эксплуатации и режимах диагностирования.

Предметом исследования являются модели и методы встроенного диагностирования на основе динамического распределения диагностических задач между элементами вычислительных систем.

Научная новизна заключается в разработанных моделях встроенной системы диагностирования и элементов вычислительных систем, методах расчёта основных показателей этих моделей, а также методе динамического распределения диагностических задач. Новизна научных результатов диссертационного исследования состоит в том, что:

1. Разработаны *модели системы диагностирования и элементов вычислительных систем*. Они *отличаются* от существующих тем, что в них основным фактором для реконфигурации системы диагностирования предложено считать техническое состояние элементов системы. Это *позволяет* учитывать показатели работоспособности элемента при распределении диагностических задач на различных этапах диагностирования.

2. Разработан *метод принятия решений в задаче диагностики элементов вычислительных систем*, позволяющий определить значения *весовых коэффициентов* для принятия решения о динамическом распределении диагностических задач. Он *отличается* от существующих тем, что значительно снижает эффекты компенсации, возникающие при использовании наиболее часто применимых алгебраических и количественных критериев. Это *позволило* повысить точность (объективность) расчёта относительной важности критериев в системе принятия решения.

Разработан *метод определения показателя надёжности элемента вычислительной системы*, исходя из текущих значений критериев работоспособности и значений их важности (весовых коэффициентов). Он *отличается* от существующих тем, что предлагает способ снижения влияния эффектов компенсации при расчёте показателя надёжности элемента вычислительной системы, на основе разработанной геометрической модели описания технического состояния. Это *позволило* учесть множество критериев работоспособности с различными значениями важности; с большей точностью определять показатели разработанных моделей; более эффективно распределять диагностическую информацию и повысить надёжность вычислительных систем.

3. Разработан *метод, позволяющий обоснованно и эффективно распределять диагностическую информацию*. Он *отличается* от существующих тем, что позволяет динамически изменять роли элементов системы встроенного диагностирования, а также учитывать техническое состояние элементов для прогнозирования их возможного состояния на следующем этапе проверки. Это *позволило* увеличить время работоспособности системы и уменьшить время её восстановления.

Теоретическая значимость работы заключается в создании моделей, методов и алгоритма работы встроенной системы диагностирования, позволяющей

повысить качественные и эксплуатационные характеристики вычислительных систем и их элементов. Методы, разработанные для расчёта основных характеристик моделей, могут быть использованы для решения других задач, в которых необходимо определить важность учитываемых критериев или принимать решения в зависимости от технического состояния элемента или системы.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенный инструментарий в виде моделей, методов, алгоритмов реализован и внедрен в составе информационного и программного обеспечения инструментария встроенного диагностирования вычислительных систем. По основным показателям отмечено, что внедрение результатов работы позволило увеличить коэффициент использования вычислительной системы в среднем на 8,3% (акт ЗАО «ИВС - Сети»). Также кластеризация отказов позволила уменьшить время восстановления системы на 5% (акт ООО «ПроИнфоСервис»). Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматика и телемеханика» (акт ФГАОУ ВО «ПНИПУ»).

Методология и методы исследования базируются на математическом аппарате и методах системного анализа, теории вероятности и математической статистики, теории надежности, технической диагностики, аналитического и имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту и их соответствие пунктам паспорта научной специальности 2.3.2 «Вычислительные системы и их элементы»:

1. Математическая модель встроенной системы диагностирования и диагностическая модель элемента вычислительной системы (п. 3).
2. Методы определения основных характеристик математической модели встроенной системы диагностирования и диагностической модели элементов вычислительной системы (п. 3).
3. Метод динамического распределения диагностических задач в вычислительных системах (п. 3).
4. Результаты апробации и внедрения разработанных моделей, методов и алгоритма в состав программно-аппаратного комплекса встроенной системы диагностирования (п. 4).

Достоверность и обоснованность результатов. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат теоретическим положениям, известным из научных публикаций мировых исследователей, и подтверждаются результатами апробации и внедрения предложенных в диссертации моделей, методов и алгоритма в реальные вычислительные системы.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах, международных и Всероссийских конференциях, в т. ч. XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (г. Москва, ИПУ РАН, 2019 г.); Конференция российских молодых исследователей в области электротехники и электроники (2021-2022 гг.), Автоматизированные системы управления и информационные технологии (г. Пермь,

2018-2021 г.г.); Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике (г. Пермь, 2018-2021 г.г.).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90001.

Публикации. Основные результаты изложены в 16 публикациях, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях; 1 статья в журнале, индексируемом в МБЦ Web of Science, 3 публикации в трудах международной конференции, индексируемых в МБЦ Scopus, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора в работах [3,13] состоит в разработке алгоритмов и ПО мониторинга и диагностики беспроводных вычислительных систем. В работе [2] автором были представлены результаты разработки математической модели встроенной системы диагностирования, а в работах [5, 10] автором был предложен алгоритм динамического распределения диагностических задач. В работе [1] автор адаптировал и доработал методику принятия решений в задачах диагностирования с учетом разных условий эксплуатации. Автор в работе [7] предложил методику определения показателя надежности элемента вычислительной системы, учитывающей текущие значения технических характеристик элемента вычислительной системы.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 109 страниц основного текста, 6 таблиц, 19 рисунков. Список использованной литературы включает 107 наименований.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, выдвинуты основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации и внедрении результатов работы, а также обоснованы методы, применяемые в дальнейшем исследовании.

В **первой главе** проведён анализ структуры вычислительных систем, произведена классификация элементов вычислительных систем, выделены их особенности. Рассмотрены способы обеспечения надежности вычислительных систем на различных этапах жизненного цикла. Выполнена математическая постановка задачи исследования.

Рассмотрены существующие диагностические модели, а также основной метод повышения надежности – использование эффективной системы диагностирования. Проведенный анализ показал, что в настоящее время сложность вычислительных систем и их элементов и возлагаемых на неё задач достаточно высока, что

подтверждает актуальность развития диагностических моделей вычислительных систем.

Значительная часть математических моделей элементов вычислительных систем, которые были рассмотрены в аналитическом обзоре, не учитывают данные о техническом состоянии элементов для определения их показателя надежности. Таким образом, необходима разработка новых моделей системы диагностирования и элементов вычислительной системы для решения поставленной задачи.

В рассматриваемых вычислительных системах, время нахождения системы в работоспособном состоянии напрямую зависит от числа её работоспособных элементов. Таким образом, величина T_p в коэффициенте технического использования зависит от характера изменения числа работоспособных элементов системы.

$$T_p = f(N_{\text{РАБ}}(t)) = f(\{EF\}, \{K\}, \{\lambda\}, N_{\text{ЭЛ}}, P), \quad (1)$$

где $N_{\text{РАБ}}(t)$ – функция изменения числа работоспособных элементов в вычислительной системе, EF – показатель надежности элемента вычислительной системы, K – значение критерия работоспособности элемента вычислительной системы, λ – значение важности критерия работоспособности, $N_{\text{ЭЛ}}$ – число элементов в системе, P – число необходимых проверок (тестов).

Таким образом, изменяя характер зависимости числа работоспособных элементов, можно увеличить время между отказами, что, в свою очередь, позволит увеличить коэффициент технического использования.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать методику эффективного перераспределения диагностических задач между элементами встроенной системы диагностирования в зависимости от технического состояния самих элементов. Методика включает в себя модель встроенной системы тестового диагностирования, модель элемента системы, а также алгоритм перераспределения диагностических задач и методы расчёта основных показателей разработанных моделей.

Во **второй главе** представлена структура, а также разработанная модель встроенной системы тестового диагностирования и диагностическая модель элемента вычислительной системы.

В структуре рассматриваемой системы предполагается, что каждый элемент, в зависимости от конфигурации, может являться объектом диагностирования или устройством диагностирования (тестером). Конфигурация каждого элемента задается устройством управления и конфигурирования (УУК), которое выполняет функциональный контроль (мониторинг). В элементе вычислительной системы реализован агент (А) – программно-аппаратный модуль, который выполняет либо функцию тестера, либо объекта диагностирования.

Модель системы можно описать в виде зависимостей входных и выходных характеристик:

$$P = f(N_{\text{КР}}, N_{\text{СРКР}}, N_{\text{НКР}}, \Delta t, EF_{\text{ПОР}}, \Delta EF) \quad (2)$$

где P – число проверок, которые будут проведены в данный диагностический интервал, $N_{\text{КР}}$ – число элементов высокой критичности, $N_{\text{СРКР}}$ – число элементов

средней критичности, $N_{\text{НКР}}$ – число элементов низкой критичности и их перечень, Δt – диагностический интервал (интервал реконфигурации), $EF_{\text{ПОР}}$ – пороговое значение характеристики надежности элемента вычислительной системы, ниже которого элемент считается неработоспособным для системы диагностирования, ΔEF – изменение показателя надежности элемента вычислительной системы при проведении тестирования.

Особенности разрабатываемой модели включают в себя:

1. Предлагается разделить элементы на произвольное количество классов, в зависимости от требований, характеристик, предпочтений и т.п. Для примера рассмотрим 3 класса элементов: *Высокой критичности* – те элементы, на которые возложены самые важные и затратные операции в системе, их необходимо диагностировать в первую очередь, и не использовать в качестве диагностического инструмента. *Средней критичности* – элементы, которые и диагностируют, и являются диагностируемыми. Половина из этого множества элементов в определённый момент времени диагностирует, когда оставшаяся диагностируется. *Низкой критичности* – используются в качестве диагностирующих элементов постоянно. Наименее загруженные элементы системы.

2. ΔEF – принимается за константу для элементов вычислительной системы. Для определения ΔEF необходимы предварительные испытания на оборудовании и расчёт по предложенным далее методам.

Математическая модель разработанной системы диагностирования определяется следующими показателями (все величины рассчитываются в начале каждого цикла диагностирования):

1. Число необходимых проверок перед началом диагностирования:

$$P_{\text{Н}} = N_{\text{КР}} + \left(N_{\text{СРКР}} - \left\lfloor \frac{N_{\text{СРКР}}}{2} \right\rfloor \right), \quad (3)$$

2. Максимальное число проверок (возможное), которое может быть проведено в данный диагностический интервал:

$$P_{\text{В}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{д}}} P_{\text{В}i}, N_{\text{д}} = N_{\text{НКР}} + \left\lfloor \frac{N_{\text{СРКР}}}{2} \right\rfloor, P_{\text{В}i} = \left\lfloor \frac{EF_i - EF_{\text{ПОР}}}{\Delta EF} \right\rfloor, \text{ при } EF_i > EF_{\text{ПОР}} \quad (4)$$

где EF_i – показатель надежности i -го элемента в начале цикла диагностирования (рассчитывается по предложенным далее методам), $\lfloor \quad \rfloor$ – операция округления в меньшую сторону. При $EF_i \leq EF_{\text{ПОР}}$ элемент больше не является тестером и не учитывается в вышеуказанных характеристиках.

Диагностическая модель элемента вычислительной системы задаётся следующими зависимостями:

$$EF_i = f(\text{роль}, \{K\}, \{\lambda\}), P_i = f(EF_i, P) \quad (5)$$

где $\{K\}$ – множество значений критериев работоспособности, $\{\lambda\}$ – множество весовых коэффициентов критериев работоспособности, P_i – число проверок, которые будут выполнены i -м элементом.

1. Показатель надежности элемента. Данный показатель необходим для оценки текущего состояния элемента вычислительной системы и определения возможности выполнения данным элементом функции тестера в системе. В общем случае, показатель надежности – некоторая функция (5), которая зависит от текущих значений характеристик работоспособности элемента и значений их важности.

Показатель надежности элемента (2 и более параметров). Для того, чтобы определить показатель надежности элемента, необходимо сначала определить весовые коэффициенты учитываемых показателей работоспособности. Для этого можно воспользоваться разработанным методом из главы 3, или прибегнуть к экспертной оценке. Результатом применения любого из этих методов является некоторое множество весовых коэффициентов показателей работоспособности элемента вычислительной системы. $M_i = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$, где N – число показателей работоспособности элемента в данной вычислительной системе.

После получения весовых коэффициентов их необходимо применить для расчёта текущей характеристики производительности. Для данного расчёта был разработан метод, описанный в главе 3. Допустимым вариантом расчёта является метод средневзвешенного значения.

2. Число проверок, которое должен провести каждый элемент:

$$P_i = \frac{EF_i \times P}{\sum_{i=1}^{N_i} EF_i}, \quad (6)$$

Таким образом, разработанные модели и математические величины их характеризующие являются основными показателями, которые будут использоваться для динамического перераспределения диагностических задач.

В **третьей** главе представлены разработанные методы определения основных показателей разработанных моделей

Метод определения важности критериев работоспособности элемента вычислительной системы

В разрабатываемом методе требуется совместить знания о критериях и их вкладе в результат принятия решений с возможностью усиления вклада дополнительной субъективной экспертной оценкой. Для разработки методики необходимо ввести некоторые определения: характеристика (системы или элемента) – количественный интегральный показатель системы или элемента. Критерий характеристики – количественный показатель системы или элемента, влияющий определённым (положительным или отрицательным) образом на одну или несколько характеристик.

Также, необходимо применить условие нормирования, которое говорит о том, что:

$$\sum_{j=1}^{N_{Cr}} \lambda_j = \sum_{j=1}^{N_{Cr}} \left(\sum_{k=1}^{N_{Ch}} U_{jk} \times C_{Chj} \right) \times x = 1 \quad (7)$$

где U_{ij} – численное значение факта участия критерия характеристики в формировании значения характеристики, C_{Chj} – значение покрытия характеристики критериями, x – нормирующий коэффициент.

На *первом* этапе расчёта по предлагаемой методике необходимо каждому оцениваемому критерию привести в соответствие критерий характеристики элемента или системы. На *втором* этапе необходимо определить характеристики системы и её элементов, на значение которых оказывают влияние выделенные на первом этапе критерии характеристики. На *третьем* этапе методики необходимо сформировать таблицу, в которой строками будут являться характеристики системы и элементов, а столбцами – критерии характеристик. С помощью эксперта (можно на этапе проектирования) проставить соответствие влияния критерия характеристики на саму характеристику. С помощью «+» обозначается наличие влияния значения критерия на значение характеристики.

Т а б л и ц а 1. Пример таблицы соответствия после 1-го этапа

	Cr_1	Cr_2	Cr_3	C_{Ch}
Ch_1	+	+		2
Ch_1		+		1
Ch_1			+	1
C_{Cr}	1	2	1	4

На данном этапе уже можно посчитать весовые значения критериев характеристик. Для этого необходимо воспользоваться формулой и решить уравнение нормирования (7) относительно коэффициента нормирования. По данному примеру результат расчёта: $\lambda_1=1/3$, $\lambda_2=1/2$, $\lambda_3=1/6$.

На *четвертом* этапе, также при помощи эксперта, возможно увеличить относительную степень влияния критерия на характеристику при помощи увеличения числа плюсов в их пересечении. Используя формулу (7), подставляя правильные значения участия критерия в значении характеристики можно получить обновленные значения весовых коэффициентов.

Метод определения показателя надежности элемента вычислительной системы. Необходимо представить элемент вычислительной системы с текущими значениями рабочих характеристик в виде конуса единичной высоты и единичного максимального радиуса.

Эта модель позволяет учитывать разную мощность характеристик, располагая их на желаемой высоте по оси Z , а также одинаково учитывать характеристики с равными весовыми коэффициентами, разместив их в модели на одинаковой высоте. Для того, чтобы рассчитать показатель работоспособности элемента, необходимо выполнить следующие шаги:

1. Вычислить объем фигуры, полученной обработкой текущих значений характеристик производительности элемента вычислительной системы.

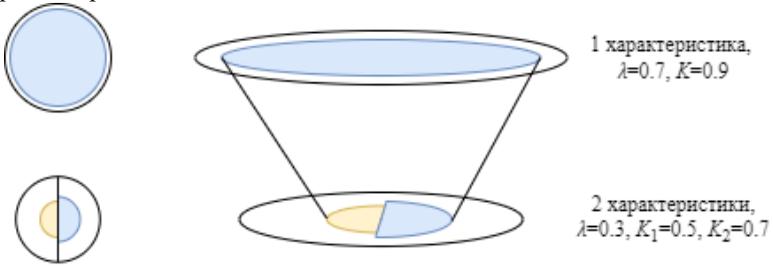


Рисунок 1. Пример 2-х уровневой модели элемента, чей объём должен быть рассчитан для определения показателя работоспособности

Чтобы определить необходимую величину, нужно выполнить несколько шагов:

1. Рассмотреть два ближайших уровня мощности и посчитать сегменты интегрирования для объема между двумя этими уровнями. Формула (8) показывает, как посчитать набор углов для одного уровня:

$$M_{ang}(l) = \left\{ \frac{2 \times \pi \times n}{N(l)} \right\}, n \in \{0, \dots, N(l)\}, \quad (8)$$

где l – уровень важности и $N(l)$ – число характеристик с весовым коэффициентом, равным l .

После этого должны быть определены все угловые отсечки для данного уровня:

$$M_{ang}(l_1, l_2) = M_{ang}(l_1) \cup (M_{ang}(l_2) - M_{ang}(l_1) \cap M_{ang}(l_2)), \quad (9)$$

$$N_{ang}(l_1, l_2) = |M_{ang}(l_1, l_2)|,$$

2. Расчёт объёма сегмента между двумя уровнями.

$$V_{segment}(l_1, l_2, s) = \int_{R(l_1, s)}^{R(l_2, s)} \rho d\rho \int_{M_{ang}(l_1, s)}^{M_{ang}(l_2, s)} d\varphi \int_{\frac{(\rho - R(l_1, s)) \times (\lambda(l_2) - \lambda(l_1))}{R(l_2, s) - R(l_1, s)} + \lambda(l_1)}^{\lambda(l_2)} dz, \quad (10)$$

$$R(l, s) = K(s) \times \sqrt{(1 - (\lambda(l) - 1))^2}, \quad (11)$$

где $\lambda(l)$ – вес на уровне l и $K(s)$ – значение характеристики в сегменте.

3. Просуммировать все объёмы между двумя уровнями

$$V(l_1, l_2) = \sum_{s=1}^{N_{ang}(l_1, l_2)} V_{segment}(l_1, l_2, s) \quad (12)$$

4. Посчитать значение объёмов между всеми парами ближайших уровней

$$V_{current} = \sum_{l=2}^{N_{power}} V(l-1, l), \quad (13)$$

где N_{power} – число различных уровней.

Чтобы определить значение показателя надежности элемента вычислительной системы, нам необходимо рассчитать объем, когда элемент имеет наилучшие значения своих характеристик. Кроме того, этот объем можно вычислить по тому же алгоритму, подставляя максимальные значения характеристик.

Для расчета значения показателя работоспособности элемента вычислительной системы необходимо найти соотношение между $V_{current}$ и V_{max} :

$$EF = \frac{V_{current}}{V_{max}} \quad (14)$$

Значение $EF \in [0; 1]$ показывает относительное состояние эффективного состояния элемента по отношению к идеальному техническому состоянию элемента.

Далее будет проведено исследование влияния эффектов компенсации на результирующий показатель надежности элемента вычислительной системы. Эффективность разработанного алгоритма будет оцениваться с помощью значения Δ :

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^N (EF_w - EF_{DEV})}{N} \quad (15)$$

Первая ситуация, которую необходимо исследовать, - это ситуация, когда есть одна характеристика с наибольшим значением веса, а текущее значение данной характеристики ниже порогового значения. Вторая ситуация – когда все характеристики с наименьшими значениями весовых коэффициентов имеют текущие значения ниже пороговых. Эксперименты проводятся для разного количества характеристик (от 2 до 6), с шагом значений = 0,1 и шагом весовой характеристики = 0,05.

Т а б л и ц а 2. Результаты эксперимента для 1-го и 2-го случая

$N_{П}$	1-й рассматриваемый случай			2-й рассматриваемый случай		
	N_C	P_y	Δ	N_C	P_y	Δ
2	33	97.98	0.112	33	100	0.191
3	363	98.65	0.144	99	100	0.163
4	3993	99.66	0.171	297	99.72	0.149
5	43923	100	0.185	891	99.35	0.142
6	483153	100	0.201	2673	98.75	0.136

Примечание. $N_{П}$ - число критериев работоспособности, N_C – число возможных ситуаций, удовлетворяющих условиям рассматриваемых случаев, P_y процент

ситуаций, в которых разработанный алгоритм оказался эффективнее средне-взвешенного, Δ - средняя разница между значениями рассчитанных показателей надежности элементов.

В первом случае результаты показывают, что с увеличением количества характеристик количество успешных случаев также увеличивается. Аналогичное увеличение наблюдается и на значении процента эффективности. Анализ результатов моделирования второго случая показывает, что с увеличением количества характеристик количество средних случаев успеха уменьшается, но уменьшается медленно.

В **четвертой** главе описывается разработанный алгоритм эффективного распределения диагностических задач.

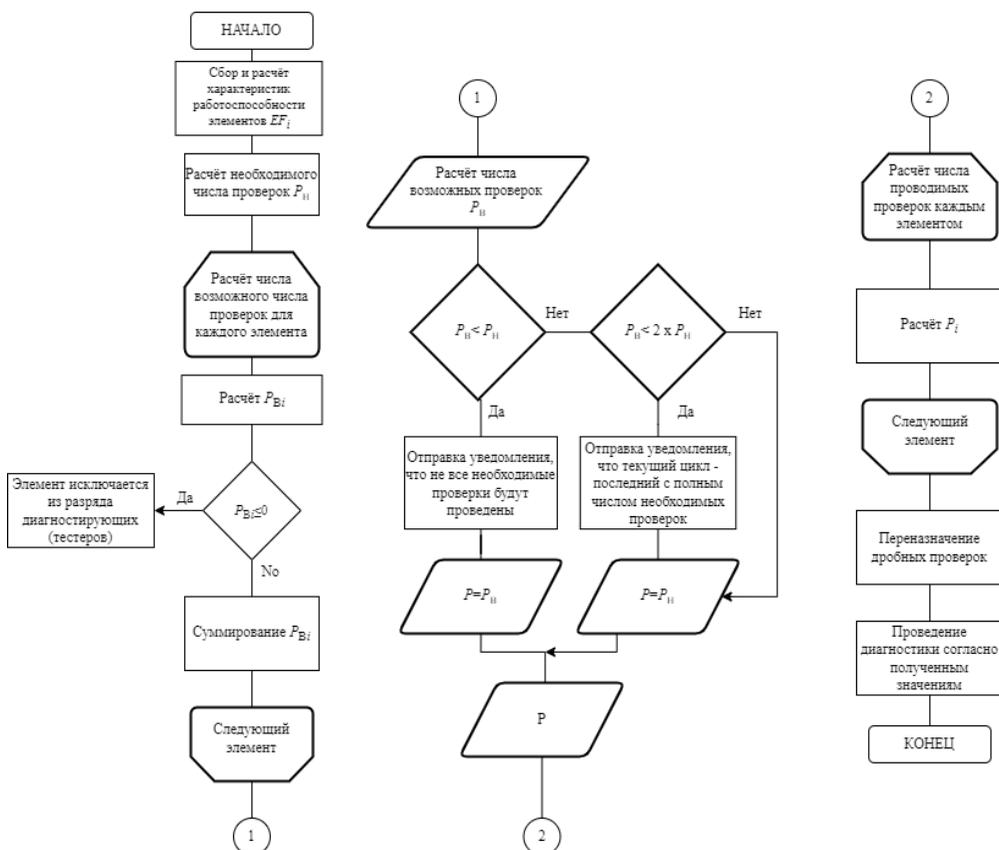


Рисунок 2. Схема алгоритма распределения диагностических задач

Для оценки разработанных моделей и алгоритма был разработан интегральный критерий оценки эффективности методик диагностирования:

$$N_p(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{НКР}} + N_{\text{СРКР}}} N_{P_i}(t), N_{P_i}(t) = \begin{cases} 0, EF_i(t) \leq EF_{\text{ПОР}} \\ 1, EF_i(t) > EF_{\text{ПОР}} \end{cases} \quad (16)$$

Результаты экспериментов представлены на рис. 3.

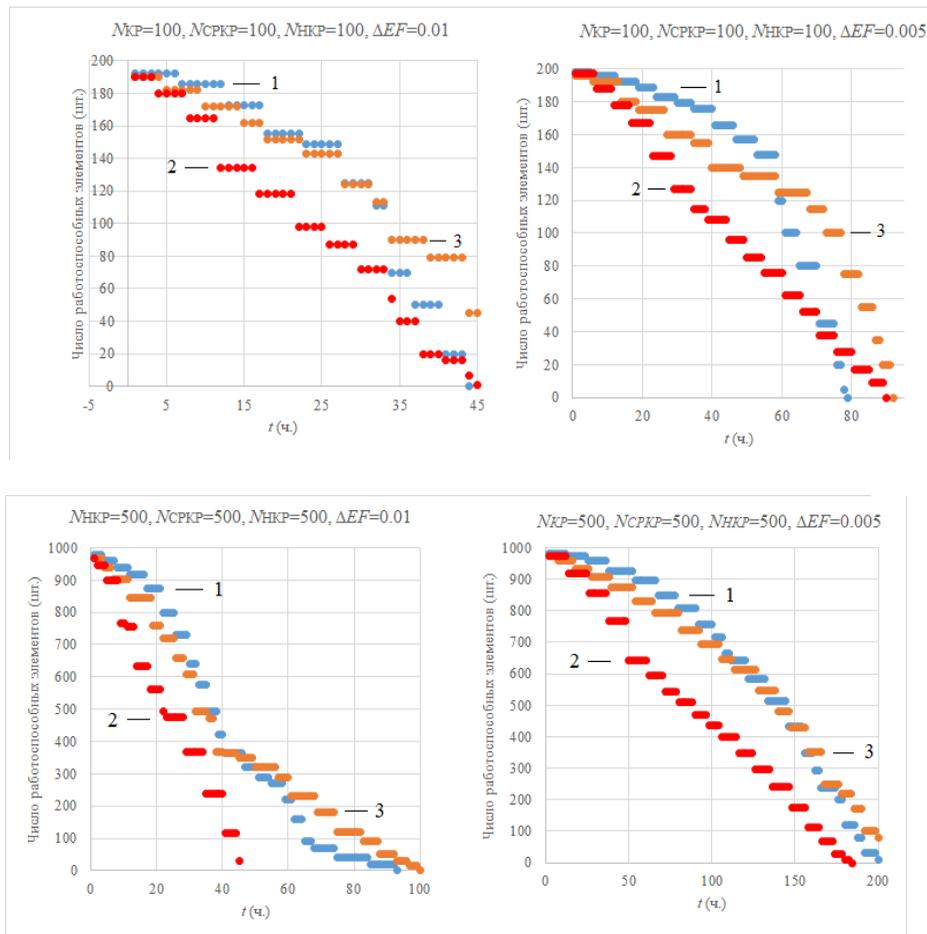


Рисунок 3. Сравнение разработанной и существующих методик. 1 – Динамическое распределение по классам, 2 – Единственный тестер (работает до отказа, затем выбирается следующий), 3 – Динамическое распределение по лучшему тестеру (выбирается по значению характеристики надежности перед началом каждого этапа диагностирования)

Результаты, полученные при помощи теоретических расчётов и программно-го моделирования, не противоречат друг другу. Были сделаны следующие выводы:

- Алгоритм является масштабируемым, так как отрицательного воздействия при изменении числа элементов или стоимости проверок не выявлено.
- По графикам видно, что характеристика изменения числа работоспособных элементов изменилась таким образом, что на первом этапе число отказавших элементов невелико. Это позволяет увеличить время работы системы T_r .
- Выделен этап работы алгоритма, когда скорость уменьшения числа работоспособных элементов увеличивается. Данный эффект позволяет в распределенных системах (элементы находятся на достаточном удалении друг от друга) произвести кластеризацию отказов.

В **пятой** главе описываются результаты внедрения, полученные в рамках диссертационного исследования. Основные результаты диссертационной работы реализованы в составе элементов вычислительных систем и внедрены в программно-аппаратный комплекс «Безопасный город».

На верхнем уровне системы находятся операторы, имеющие доступ к интерфейсу программного комплекса центра обработки и отображения информации. Данные в этот центр поступают со стационарных или мобильных постов, являющимися центром кластера. Кластер состоит из поста и различных датчиков, фиксирующих дорожную обстановку и проезжающие автомобили.

В данной системе было реализовано встроенное диагностирование внутри кластера по алгоритму единственного тестера. При этом тестером в рамках очереди может стать устройство, текущие технические характеристики которого не являются лучшими для выполнения диагностических операций. С целью повышения эффективности проведения процедур диагностики, а также улучшения эксплуатационно-технических показателей вычислительной системы разработанные модели, методы и алгоритм были адаптированы и внедрены в состав программного обеспечения самих комплексов фиксации, постов, отвечающих за управление кластерами комплексов фотофиксации, а также в программную реализацию системы, агрегирующей и отображающей полученные данные на пультах операторов системы.

Так, на рис. 4 представлены характеристики изменения числа работоспособных элементов до и после внедрения результатов диссертационной работы.

Исследуя графики можно сделать несколько выводов:

- Разработанные модели, методы и алгоритм позволили увеличить время нахождения системы в работоспособном состоянии в наблюдаемом периоде с 11 до 12 часов (8,3%), что в свою очередь позволяет увеличить коэффициент технического использования системы.
- Резкие изменения числа работоспособных элементов в интервале 0-1ч и 8-9ч (соответственно 08:00-09:00 и 17:00-18:00) объясняется увеличением дорож-

ного трафика, а также увеличением числа регистрируемых фотофактов, что увеличивает рабочую нагрузку на элементы системы.



Рисунок 4. Характеристики изменения числа работоспособных элементов до и после внедрения результатов диссертационной работы

Согласно критерию Пирсона, характеристики, полученные в результате моделирования, и реальная характеристика со степенью достоверности 0.95 согласуются с вероятностью 0.97.

Внедрение результатов диссертационной работы позволило увеличить коэффициент технического использования системы, путем изменения поведения характеристики числа работоспособных элементов. Система уведомлений, заложенная в алгоритме, позволила в некоторых случаях предотвратить возникновение отказов путём своевременного проведения ремонтных и регламентных работ.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической проблемы – улучшение эксплуатационно-технических показателей вычислительных систем и их элементов на основе эффективного применения системы встроенного диагностирования. В диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработаны математические модели встроенной системы тестового диагностирования и элемента вычислительной системы. Использование данных моделей позволило представить элемент вычислительной системы в виде «черного ящика» с набором характеристик. Это, в свою очередь, позволит использовать

разработанную модель встроенной системы диагностирования с достаточной степенью точности описания элементов в любой области применения вычислительных систем.

2. Для расчёта основных показателей разработанных моделей были разработаны два новых метода – метод принятия решений в задачах диагностики, позволяющий определить весовые коэффициенты учитываемых характеристик работоспособности и метод расчёта показателя надёжности элемента вычислительной системы. Первый метод может быть использован при решении различных задач, при правильном определении степени участия каждой характеристики в том показателе, который необходимо повысить. Второй метод также может быть использован при решении различного круга задач, в которых необходимо определять текущее состояние работоспособности элемента вычислительной системы, например, задачи мониторинга.

3. Разработан и апробирован алгоритм распределения диагностических задач между элементами встроенной системы тестового диагностирования. Использование данного алгоритма позволяет эффективно распределять диагностическую информацию между элементами вычислительной системы, что было показано на примере моделирования при помощи ПО и результатами внедрения в реальную систему.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в улучшении качественных и эксплуатационных характеристик вычислительной системы и её элементов, что подтверждается актами внедрения.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Клейман, Л.А.** Методика принятия решений в задаче диагностики элементов информационно-управляющих систем / Л.А. Клейман // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 38. – С. 90-109.

2. **Клейман, Л.А.** Повышение надёжности функционирования элементов информационно-управляющих систем с применением встроенных средств диагностирования / Л.А. Клейман, Е.Л. Кон, В.И. Фрейман, А.А. Южаков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и информационные системы. – 2019. – № 3(43). – С. 29-40.

3. **Клейман, Л.А.** Мониторинг и диагностика элементов беспроводных информационно-управляющих систем / Л.А. Клейман, В.И. Фрейман, А.А. Южаков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2018. – № 4(40). – С. 58-73.

Научные статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в МБЦ:

4. **Kleiman, L.A.** Improving the functioning reliability of the information management system elements, using built-in diagnostic tools / L.A. Kleiman, V.I. Freyman // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2021. - №1. – pp. 158–171 (Web of Science)

5. **Kleiman, L.A.** Mathematical Model for Determining the Reliability Indicators of Computing System Elements / L.A. Kleiman, V.I. Freyman // Proceedings of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRus). – pp. 693-696. (Scopus)

6. **Kleiman, L. A.** The Method of Dynamic Distribution of the Diagnostic Load between Information and Control Systems Elements / L.A. Kleiman, V.I. Freyman // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRus). – pp. 952-955. (Scopus)

7. Kavalero, M.V. Adaptive Q-routing with Respect to Energy Consumption Model / M.V. Kavalero, **L.A. Kleiman**, V.I. Freyman // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRus). – pp. 22-27. (Scopus)

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, полученные по тематике диссертационной работы:

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619216 Российская Федерация. Приложение администратора системы мониторинга и диагностирования элементов и устройств беспроводных информационно-управляющих систем (Front_Monitor) : № 2018616593 : заявл. 26.06.2018 : опубл. 02.08.2018 / **Л.А. Клейман**, В.И. Фрейман ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660059 Российская Федерация. Сервер системы мониторинга и диагностирования элементов и устройств беспроводных информационно-управляющих систем (Back_Monitor) : № 2018616627 : заявл. 26.06.2018 : опубл. 15.08.2018 / **Л.А. Клейман**, В.И. Фрейман ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Материалы, опубликованные в тезисах докладов, материалах конференций и прочих источниках:

10. **Клейман, Л.А.** Методика повышения надежности элементов информационно-управляющих систем с применением встроенных средств диагностирования / Л.А. Клейман, В.И. Фрейман // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2020. – Т. 1. – С. 63-71.

11. **Клейман, Л.А.** Повышение надежности устройств беспроводных систем управления на основе метода анализа тепловых карт / Л.А. Клейман, В.И. Фрейман // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 : Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва, 17–20 июня 2019 года / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 2866-2873.

12. **Клейман, Л.А.** Реконфигурирование встроенной системы тестового диагностирования элементов информационно-управляющих систем / Л.А. Клейман, В.И. Фрейман // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2019. – Т. 1. – С. 13-18.
13. **Клейман, Л.А.** Система управления и мониторинга точек Wi-fi доступа / Л. А. Клейман, В. И. Фрейман // Автоматизированные системы управления и информационные технологии : Материалы всероссийской научно-технической конференции. В 2-х томах, Пермь, 17 мая 2018 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2018. – С. 256-260.
14. **Клейман, Л.А.** Система мониторинга и диагностики коммуникационных элементов беспроводных систем управления / Л.А. Клейман, В.И. Фрейман // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2018. – Т. 1. – С. 384-389.
15. **Клейман, Л. А.** Система управления точками Wi-fi-доступа / Л.А. Клейман, В.И. Фрейман // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2017. – № 1. – С. 39-45.
16. **Клейман, Л.А.** Метод моделирования дискретных событий в качестве инструмента диагностики элементов информационно-управляющих систем / Л.А. Клейман, В.И. Фрейман // Автоматизированные системы управления и информационные технологии : Материалы всероссийской научно-технической конференции: в двух томах, Пермь, 30–31 мая 2019 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2019. – С. 51-56.