

На правах рукописи



ВОРОН Александр Максимович

**Модели и алгоритмы диагностирования технических систем
с учетом ошибок контрольно-измерительной аппаратуры (КИА)**

Специальность 05.13.01. – «Системный анализ, управление и обработка
информации (в науке и промышленности)» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2016

Работа выполнена на кафедре «Вычислительные системы и технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения профессионального образования «Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева».

Научный руководитель: **Ломакина Любовь Сергеевна**
доктор технических наук, профессор,
«Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
профессор кафедры «Вычислительные системы
и технологии»

Официальные оппоненты: **Каширина Ирина Леонидовна**,
доктор технических наук, доцент,
«Воронежский государственный университет»,
доцент кафедры «Математические методы
исследования операций».

Банкрутенко Владимир Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
АО "Опытное Конструкторское Бюро
Машиностроения им. И.И.Африкантова" (АО
«ОКБМ Африкантов»)
главный специалист отдела информационных
технологий.

Ведущая организация: ОАО «Научно – исследовательский центр
контроля и диагностики технических систем»
(ОАО «НИЦ КД»), г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится «15» декабря 2016 года в 11 часов в ауд.
1315 на заседании диссертационного совета Д.121.165.05 при
Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е.
Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского
государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева и на сайте
<http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суркова Анна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в области информационных технологий все большее место занимает построение многофункциональных сложных систем, в том числе технических систем, технологических процессов и программных комплексов. С увеличением сложности вычислительных систем непрерывно возрастает роль методов и средств поддержания их в состоянии постоянной работоспособности, в том числе средств автоматического поиска неисправностей.

Одним из методов измерения и обеспечения качества технических, технологических и программных систем является тестирование. Выполнение тестов связано с затратой материальных ресурсов, поэтому возникает задача построения оптимальной тестовой последовательности, обеспечивающей минимум затрат на обнаружение неисправности в диагностируемой системе.

Вопросам диагностирования сложных систем посвящено большое количество работ П.П. Пархоменко, И.А. Биргер, Д.В. Сперанского, В. И. Борщевича, С. Н. Филимонова, М.Ф. Каравай, Г.Ф. Верзакова, С.V. Ramamoorthy и других российских и зарубежных ученых. Однако, известные в настоящее время методы и алгоритмы диагностирования технических систем, как правило, не учитывают ошибки контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), как всевозможные измерительные устройства – датчики, сигнализаторы.

К сожалению, при измерении информационных параметров системы всегда имеют место ошибки, которые снижают эффективность локализации дефектов в системе и чаще всего делают ее невозможной. Поэтому разработка методов и алгоритмов, которые снижают влияние ошибок КИА на результат диагностирования, является актуальной.

Целью работы является разработка моделей и алгоритмов диагностирования систем с обнаружением и исправлением ошибок КИА, возникающих при измерении параметров.

Задачи работы.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

- анализ существующих детерминированных и стохастических методов диагностики;
- разработка диагностической модели на основе концепции скрытого параметра;

– модификация алгоритма условного выбора точек контроля, которая обнаруживает и исправляет ошибки контрольно-измерительной аппаратуры, что позволяет снизить вероятность получения ошибочного результата диагностирования;

– оценка сложности модифицированного алгоритма;

– демонстрация результатов работы алгоритма на контрольных примерах и выполнение программной реализации.

Методы исследования.

Для решения поставленных задач применялись методы, основанные на теории множеств, теории графов, теории информации, теории надежности и методах оптимизации.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Обоснована целесообразность использования концепции скрытого параметра, позволяющей интерпретировать ошибки контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) как скрытые параметры процесса диагностирования.

2. На основе концепции скрытого параметра была разработана диагностическая модель, отличающаяся от существующих учетом воздействия ошибок КИА на процесс диагностирования.

3. Разработана модификация алгоритма условного выбора точек контроля, позволяющая обнаруживать и исправлять ошибки КИА и, тем самым, повысить эффективность диагностирования технических систем по сравнению с известными методами.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обеспечены корректным использованием современного математического аппарата и подтверждены результатами экспериментальных исследований на реальном примере.

Практическая значимость и внедрение.

Практические результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, используются в АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники» и учебном процессе подготовки магистров по направлению «Информатика и вычислительная техника» по программе «Диагностические и информационно-поисковые системы» в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева. Получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011610230 от 11 января 2011 г. и №2012614562 от 22 мая 2012г.

Результаты работы использованы в госбюджетной НИР (Отчет по НИР «Диагностирование сложных технических систем», Интернет-номер

И131205122130 от 25.11.13 – Н.Новгород: НГТУ), выполненной в рамках НИОКР «Диагностические и информационно-поисковые системы» (Номер государственной регистрации 01201252337, Интернет-номер И111112195013, руководитель работы Ломакина Л.С.).

Апробация полученных результатов.

Основные положения диссертации представлялись и докладывались на следующих научных конференциях:

- Международной молодежной конференции «Будущее технической науки» г. Н.Новгород, 2011 г.
- Международных научно-технических конференциях «Информационные системы и технологии (ИСТ-2011, ИСТ-2012)» г. Н. Новгород, 2011 г., 2012 г.
- IV, V, VI Всероссийских научно-технических конференциях «Прикладная информатика и математическое моделирование» г. Москва, 2010 г., 2011 г., 2012 г.
- III Международной научно-практической конференции «Информационные управляющие системы и технологии», г. Одесса, 2014 г.
- XIX-th International Open Science Conference «Modern informatization problems», Yelm, WA, USA, 2014.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Диагностическая модель на основе концепции скрытого параметра;
2. Модификация алгоритма условного поиска дефекта, позволяющего обнаруживать и исправлять ошибки контрольно-измерительной аппаратуры и его программная реализация;
3. Результаты экспериментальных исследований.

Публикация результатов.

По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 3 работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, 1 монография, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- участие в постановке целей и задач исследования;
- построение диагностической модели на основе концепции скрытого параметра;
- разработка модифицированного алгоритма диагностирования;
- участие в программной реализации алгоритма;
- участие во внедрении созданного программного обеспечения.

Лично автором и при участии автора выполнена подготовка публикаций по представленной работе.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Научные положения диссертации соответствуют паспорту научной специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и промышленности). Результаты проведенного исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности:

- формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации
- разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации
- разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 98 наименований, а также приложений. Общий объем работы 118 страниц текста, содержащего 21 рисунок и 15 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследования, его объект и предмет, сформулирована цель исследования и его задачи.

В первой главе (Обзор существующих методов диагностирования) исследуется состояние проблемы диагностирования технических систем, анализируются основные результаты, полученные в этой области, и приводится обоснование необходимости построения моделей и алгоритмов диагностирования технических систем.

Во второй главе (Базовая модель объекта диагностирования) предложена базовая (математическая) модель представления технической системы и сформулирован информационный критерий качества диагностирования систем.

Пусть $G(V, U)$ – упорядоченный граф с n вершинами, представляющий **модель объекта диагностирования**. Обозначим V – множество вершин графа, U – множество ребер графа. Вершины графа соответствуют блокам объекта, а ребра графа – связям между блоками. Обозначим через $X = \{x_1, \dots, x_q\}$ ($q \leq n$) множество входов графа $G(V, U)$, а через $W = \{w_1, \dots, w_p\}$ ($1 \leq p$) – множество выходов.

Если в объекте диагностирования в некоторый момент времени одновременно отказало некоторое множество блоков, то совокупность номеров $\{\eta_1, \dots, \eta_k\}$ соответствующих вершин графа G , представляющего модель объекта диагностирования, назовем **дефектом** кратности k ($1 \leq k \leq n$).

Обозначим через $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ вектор вероятностей появления дефекта в каждом блоке системы. При отсутствии значений вероятностей будем считать появление дефекта в каждом блоке равновероятным событием.

Пусть имеет место дефект $\{\eta_1, \dots, \eta_k\}$. **Состоянием объекта диагностирования** назовем n -мерный вектор $s = \{s_1, \dots, s_n\}$, в котором:

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{если номер вершины } i \in \{\eta_1, \dots, \eta_k\}; \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Всего будет 2^n состояний объекта. Всё множество состояний S можно рассматривать как пространство элементарных событий $s \in S$, каждое из которых может наступить после эксплуатации системы в течение заданного времени с вероятностью, равной: $p(s) = \prod_{j \in I} p_j \prod_{j \in J} (1 - p_j)$,

где p_j - вероятность появления дефекта в j -ом блоке;

J - множество номеров исправных блоков;

I - множество номеров неисправных блоков.

При этом предполагается, что дефект в одном из блоков не влияет на вероятность появления дефектов в других блоках.

Будем полагать, что вершины x и r в графе $G(V, U)$ образуют **контрольную пару** (x, r) , если в соответствующей системе сигнал, подаваемый на вход элемента x , может быть снят на выходе элемента r . Очевидно, для того чтобы пара (x, r) была контрольной, необходима достижимость вершины r графа $G(V, U)$ из вершины x . В дальнейшем контрольную пару будем называть **точкой контроля**, а множество точек контроля обозначим Z .

Вектором проверки точки контроля (x, r) назовем n -мерный вектор $b(x, z) = \{b_1, \dots, b_n\}$, компонента b_i которого равна 1, если существует хотя бы один путь от x к r , содержащий вершину i , и равна 0 в противном случае.

Пусть для упорядоченного графа $G(V, U)$ на n вершинах задано некоторое исходное множество Z точек контроля. Тогда **матрицей проверок** $B_z = \|b_{ij}\|$ ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$) на множестве Z точек контроля назовем матрицу, в которой:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } j \text{ входит в проверку } i\text{-й контрольной пары;} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Проверка сигнала в каждой точке контроля позволяет судить о работоспособности всех блоков соответствующего подмножества, которое

определяется совокупностью единиц в соответствующей строке матрицы проверок.

Определим **диагностический эксперимент** как процесс тестирования системы точками контроля $z \in Z'$. Если Z' содержит m точек контроля, то **результатом диагностического эксперимента** будет являться m -мерный вектор $y = \{y_1, \dots, y_m\}$, для которого выполняется соотношение: $y = Bs$. Матрица B является математической моделью канала связи между множеством состояний системы S и множеством результатов диагностирования Y .

Компоненты вектора y равны 1, если значение измеряемого параметра в соответствующей точке контроля вышло из допуска и равны 0 в противном случае. Таким образом, при выходе из строя одного из блоков вектор y совпадает с соответствующим столбцом матрицы проверок. В случае выхода из строя нескольких блоков с номерами η_1, \dots, η_k вектор y равен логической поэлементной сумме соответствующих столбцов матрицы:

$$y_l = b_{l\eta_1} \vee b_{l\eta_2} \vee \dots \vee b_{l\eta_k} \quad (l = \overline{1, m})$$

Таким образом, диагностический эксперимент доставляет некоторый вектор $y_i \in Y$, который характеризует состояние системы с точностью до некоторого подмножества, причём вероятность $p(y_i)$ определяется как сумма вероятностей всех состояний, входящих в соответствующее подмножество.

Информационный критерий позволяет оценить глубину локализации дефекта. Под глубиной локализации дефекта будем понимать отношение количества информации $I(\hat{S}, Y)$, которое доставляет диагностический эксперимент, к общему количеству информации $H(\hat{S})$, которое необходимо получить, чтобы определить, в каком из состояний находится система:

$$K = \frac{I(\hat{S}, Y)}{H(\hat{S})}, \quad I(\hat{S}, Y) = H(Y) - H(Y/\hat{S}), \quad \text{где} \quad H(Y) = - \sum_{y_i \in Y} p(y_i) \log p(y_i) -$$

неопределенность исхода диагностического эксперимента.

Условная неопределенность исхода диагностического эксперимента $H(Y/\hat{S}) = 0$, поскольку неопределённость появления y_i при заданном состоянии системы $s \in \hat{S}$ равна нулю, поэтому $I(\hat{S}, Y) = H(Y)$.

Задача максимизации глубины локализации дефекта сводится к выбору из допустимого множества точек контроля такого подмножества заданного размера, при котором диагностический эксперимент доставляет максимальное количество информации о системе.

Для точного определения состояния системы необходимо, чтобы количество информации, которое в среднем доставляет диагностический эксперимент, определялось как $I(\hat{S}, Y) = H(\hat{S})$,

где $H(\hat{S}) = -\sum_{k=1}^{2^n-1} \hat{p}(s) \log \hat{p}(s)$ - неопределённость состояния системы, равная

количеству информации, которое необходимо получить, чтобы определить, в каком из состояний находится система;

$\hat{p}(s) = \frac{p(s)}{1 - p(\bar{0})}$ - условная вероятность наступления состояния s при

условии, что система неисправна;

$p(\bar{0})$ - вероятность безотказной работы системы.

В процессе выполнения тестов может произойти ошибочное решение о значении измеряемого параметра, которое приводит к исключению неисправного блока из подмножества блоков, подозреваемых на наличие дефекта, при этом вероятность ошибочного решения зависит от точности измерительного устройства и помех в каналах связи, используемых для передачи контрольных сигналов и результатов диагностического эксперимента. Факт появления ошибки КИА с некоторой вероятностью можно контролировать по последовательно идущим отрицательным результатам диагностического эксперимента (результат эксперимента равен 0, несмотря на наличие дефекта). Последовательность отрицательных результатов (**наблюдаемые параметры**) тестирования является структурой, которая сформирована **скрытым параметром** – ошибкой КИА (рис. 1).

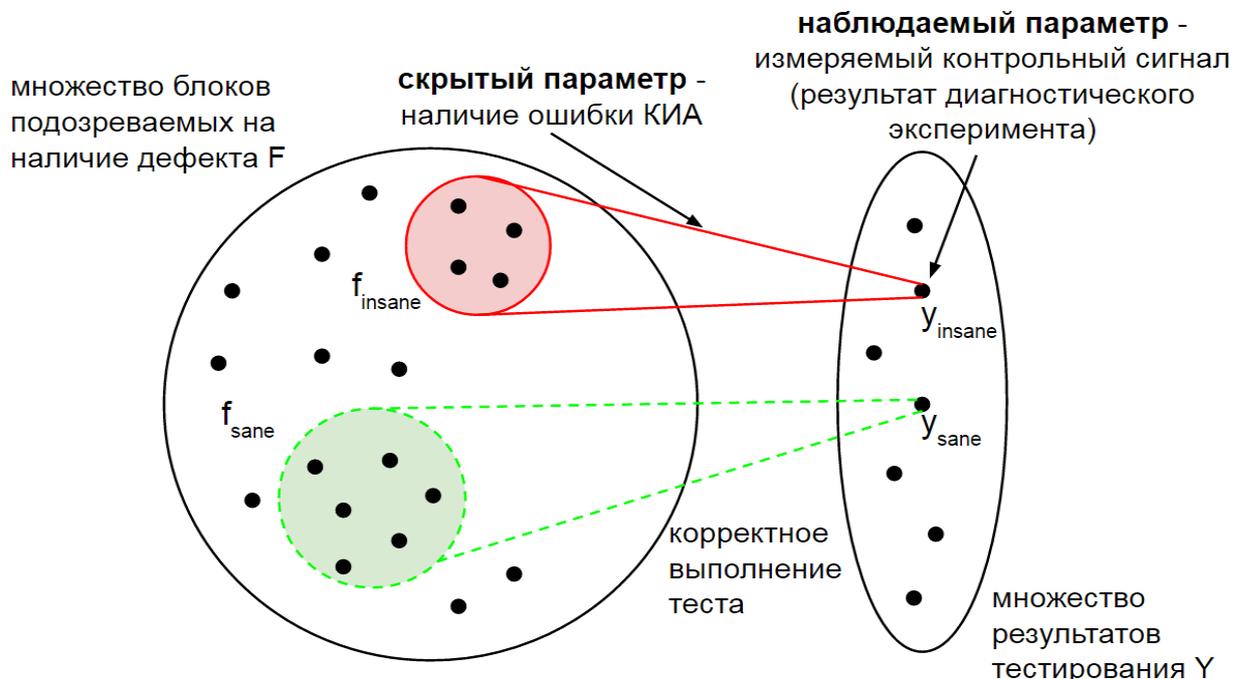


Рис. 1. Наблюдаемые и скрытые параметры в задаче диагностирования

Таким образом, анализ наблюдаемых параметров – результатов тестирования системы позволяет обнаружить скрытый параметр – наличие ошибки КИА.

В третьей главе (Диагностическая модель объекта на основе концепции скрытого параметра) на основании информационного критерия и концепции скрытого параметра была разработана обобщающая диагностическая модель, включающая в себя методы и алгоритмы поиска дефекта при наличии ошибок КИА:

Алгоритм 1. Алгоритм условного поиска дефекта, когда выбор очередной точки контроля зависит от результата тестирования объекта диагностирования с помощью предыдущей точки контроля;

Алгоритм 2. Алгоритм безусловного поиска дефекта, когда выбор очередной точки контроля не зависит от результата тестирования объекта диагностирования с помощью предыдущей точки контроля;

Алгоритм 3. Модификация алгоритма условного поиска дефекта с учетом ошибок КИА;

Алгоритм 4. Алгоритм статистического моделирования неисправного состояния объекта диагностирования.

Алгоритм 1. Алгоритм условного поиска дефекта

Данный алгоритм позволяет выбрать последовательность точек контроля, которая доставляет максимальное количество информации об объекте, находящемся в определенном состоянии. После выбора очередной точки контроля проводится диагностический эксперимент, результат которого влияет на выбор очередной точки контроля (рис. 3).

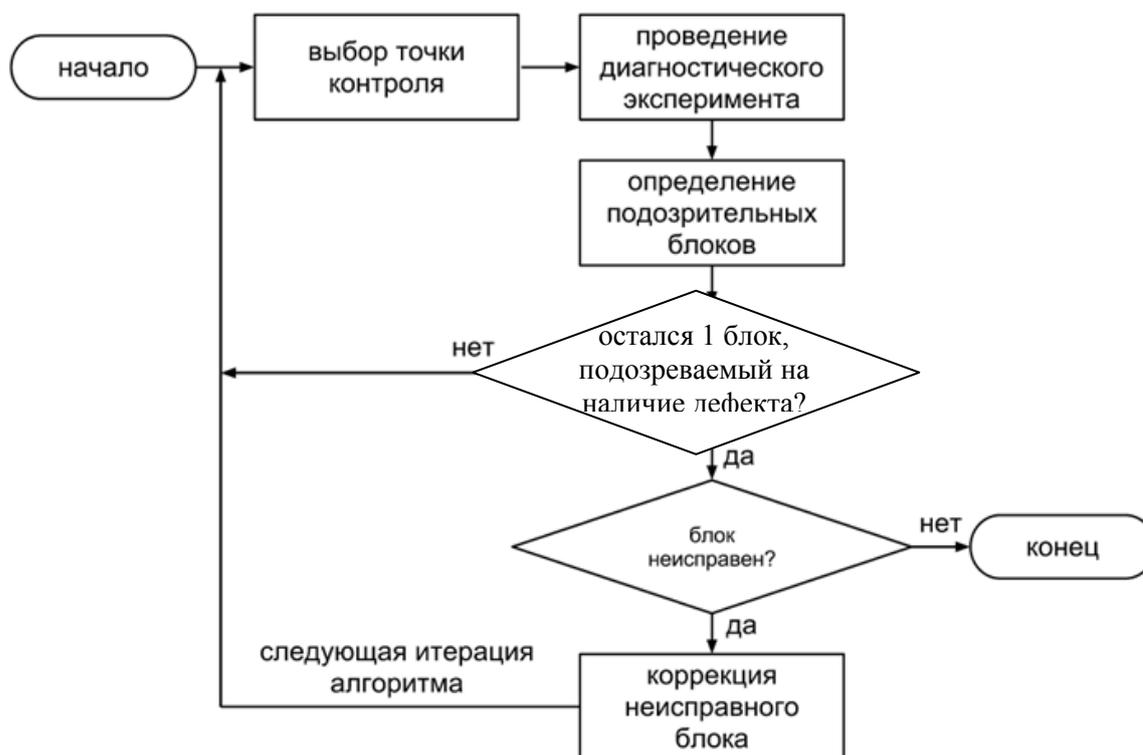


Рис. 3. Блок-схема алгоритма условного поиска дефекта

Алгоритм 2. Алгоритм безусловного поиска дефекта

Данный алгоритм позволяет выбрать последовательность точек контроля, которая доставляет максимальное количество информации об объекте в среднем. Для этого на первом шаге алгоритма выбирается точка контроля, которая доставляет максимальное количество информации, а на каждом последующем шаге выбирается точка контроля, которая доставляет максимальное дополнительное количество информации об объекте (рис. 2).

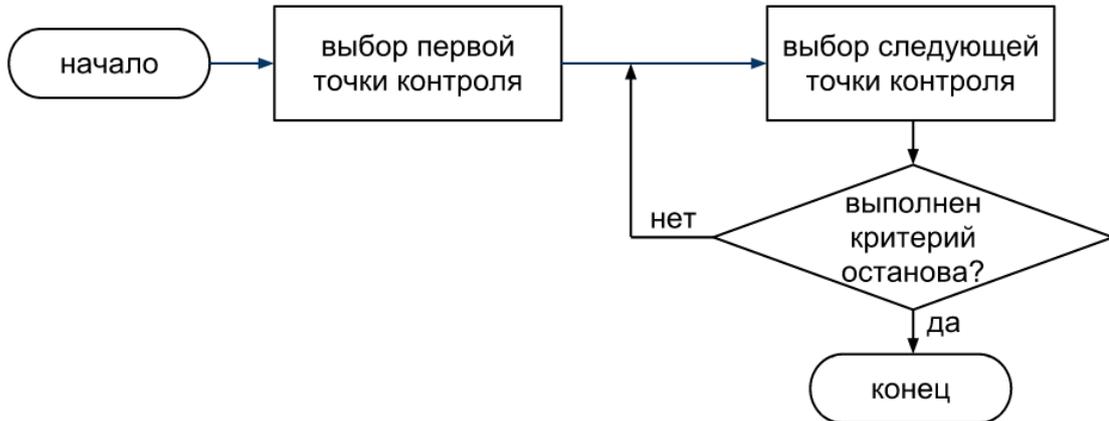


Рис. 2. Блок-схема алгоритма безусловного поиска дефекта

В алгоритмах 1 и 2 считается, что результаты проверок являются достоверными. При измерении информационных параметров системы имеют место ошибки, которые снижают эффективность локализации дефектов в системе и чаще всего делают ее невозможной. Если при измерении параметра принято ложное решение (дефект не обнаружен), то неисправные блоки, которые проверяются на основе данной точки контроля, будут исключены из подмножества блоков, подозреваемых на наличие дефекта. Если данная проверка определяет состояния не всех дефектных блоков, тогда начнется процесс поиска дефекта в блоках, состояния которых данная проверка не определяет, в противном случае результаты всех последующих проверок будут равны нулю. Таким образом, если ошибка КИА произошла при проверке системы с помощью точки контроля, которая определяет состояния всех неисправных блоков, то результат диагностирования будет неверным.

Алгоритм 3. Модификация алгоритма условного поиска дефекта с учетом ошибок КИА

В алгоритме 3 факт исключения неисправного блока из подмножества блоков, подозреваемых на наличие дефекта, подтверждается по m последовательно идущим отрицательным результатам эксперимента (дефект не обнаружен), где значение m подбирается экспериментально. Данная последовательность отрицательных результатов эксперимента является

наблюдаемым параметром, на основании которого определяется ошибка КИА. Для снятия неопределенности в установлении указанного факта в качестве очередных тестовых проверок выбираются $m+1$ предыдущих проверок. Если результаты тестовых проверок не изменились, то ошибка отсутствует, в противном случае произошла ошибка в проверке, результат которой изменился. После обнаружения ошибки неисправный блок включается в подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефекта, и процедура поиска дефектов продолжается (рис. 4).

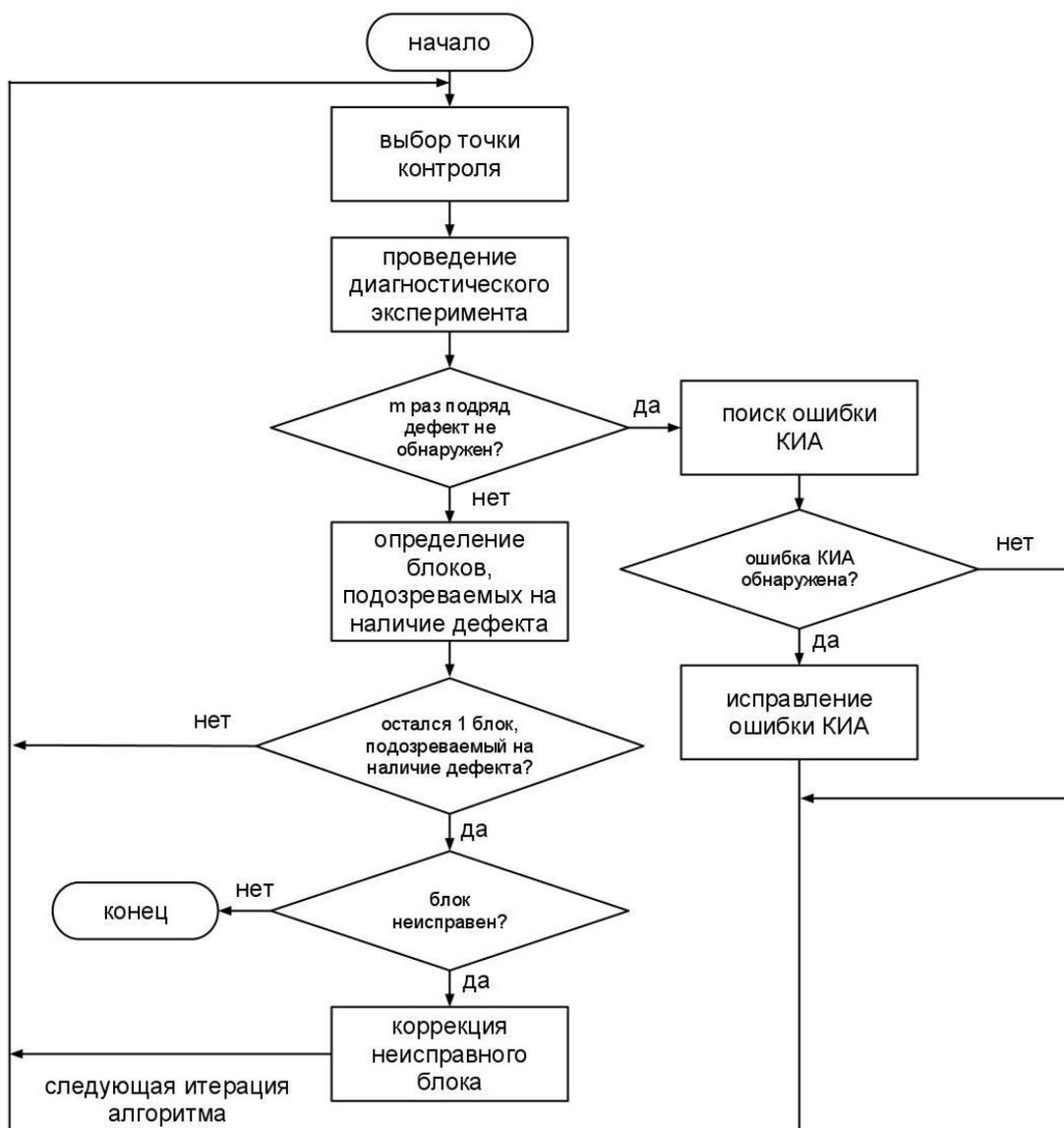


Рис. 4. Блок-схема модификации алгоритма условного поиска дефекта с исправлением ошибок КИА

В алгоритмах безусловного и условного выбора точек контроля выбор очередной точки контроля зависит от количества информации, которое доставляет диагностический эксперимент с ее использованием.

Точное вычисление энтропии связано с большим объемом вычислений и их сложностью – необходимо рассмотреть все состояния системы, чтобы разбить их на подмножества, каждому из которых соответствует свой вектор результата диагностического эксперимента y . Кроме этого, в данной задаче диагностирования не требуется высокой точности вычислений, поскольку реальные вероятности отказа блоков также задаются приближенно, а вероятности состояний системы резко убывают с ростом кратности дефекта. Поэтому в работе предложен метод статистической оценки вероятности состояния системы и, соответственно, энтропии – системной информации между состояниями системы и результатами диагностического эксперимента.

Если генерировать все состояния системы, а потом отбрасывать работоспособные состояния системы, то при малых вероятностях отказов блоков p_1, \dots, p_n будет затрачено много машинного времени. Для моделирования только неисправных состояний системы выполняется переход от пространства всех состояний системы S к пространству неисправных состояний системы Q (рис. 5).

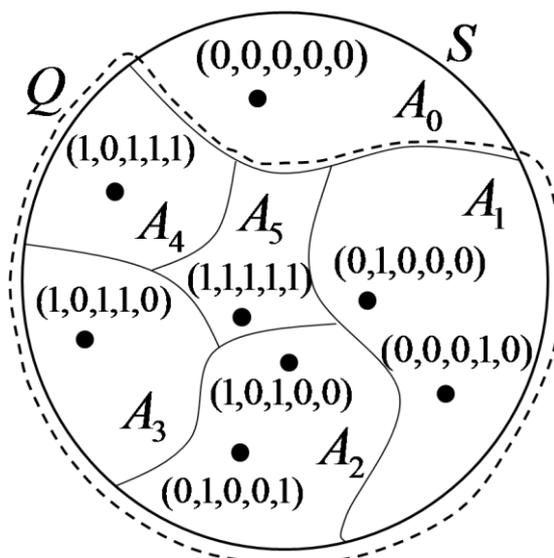


Рис. 5. Пространство всех состояний системы S (сплошная линия) и пространство неисправных состояний системы Q (пунктирная линия)

Этот переход к пространству элементарных событий Q позволяет исключить событие исправного состояния системы из множества возможных событий.

Алгоритм 4. Алгоритм статистического моделирования неисправного состояния объекта диагностирования

1. Выполняется переход от пространства всех состояний системы S к пространству неисправных состояний системы Q . Новое пространство

неисправных состояний системы Q образует полную группу несовместных событий. Для перехода в пространство неисправных состояний системы вычисляется вероятность появления дефекта произвольной кратности в системе $p(Q) = 1 - p(\bar{o})$,

где $p(\bar{o}) = \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$ – вероятность исправной работы системы.

2. В пространстве неисправных состояний системы вычисляются вероятности появления дефекта кратности k ($k = \overline{1, n}$). Для этого вычисляются условные вероятности появления дефекта кратности k при условии, что система неисправна:

$$p_n(k) = \sum_{p_k \in A_k} \frac{P_k}{p(Q)},$$

где A_k – множество состояний системы с дефектом кратности k .

3. Для генерации неисправного состояния системы необходимо определить кратность дефекта k . Для этого генерируется кратность дефекта k с учетом вероятностей, вычисленных на предыдущем шаге.

4. Генерируется состояние системы с дефектом кратности k . Неисправное состояние системы с дефектом кратности k можно представить как совместное появление k событий – отказ блока.

4.1. Вычисляются вероятности появления первого события – однократного дефекта. Для этого вычисляются условные вероятности отказа i -го блока ($i = \overline{1, n}$) при условии, что в системе имеется однократный дефект:

$$p_i(1) = \frac{p_i \prod_{j \in J} (1 - p_j)}{p_n(1) \times p(Q)}$$

4.2. С учетом вероятностей, вычисленных на предыдущем шаге, генерируется состояние системы с однократным дефектом.

4.3. Вычисляются вероятности появления следующего события. Для этого вычисляются вероятности отказа оставшихся $(n-d)$ исправных блоков при

условии, что d блоков неисправны: $p_j(d+1) = \frac{g_i}{\sum_{j \in J} g_j}$, где $g_j = \frac{p_j}{q_j}$ – отношение

вероятности неисправного состояния к вероятности исправного состояния блока $j \in J$; J – множество исправных блоков.

4.4. С учетом вероятностей, вычисленных на предыдущем шаге, генерируется состояние системы с дефектом кратности $(d+1)$.

4.5. Процедура генерации состояния системы заканчивается после того, как будет сгенерировано состояние системы с дефектом кратности k . Таким образом, пункты 4.3 и 4.4 выполняются $(k-1)$ раз.

В четвертой главе (Практическая реализация и вычислительные эксперименты) рассмотрено применение разработанной модификации алгоритма условного поиска дефектов с учетом ошибок КИА применительно к диагностированию электромеханических (на примерах системы импульсно-фазового управления тиристорного электропривода и комплектного электропривода) и радиотехнических систем (на примерах импульсной доплеровской радиолокационной станции и метеорадиолокатора).

I. Электромеханические системы (на примере комплектного электропривода)

Граф комплектного электропривода представлен на рис. 6.

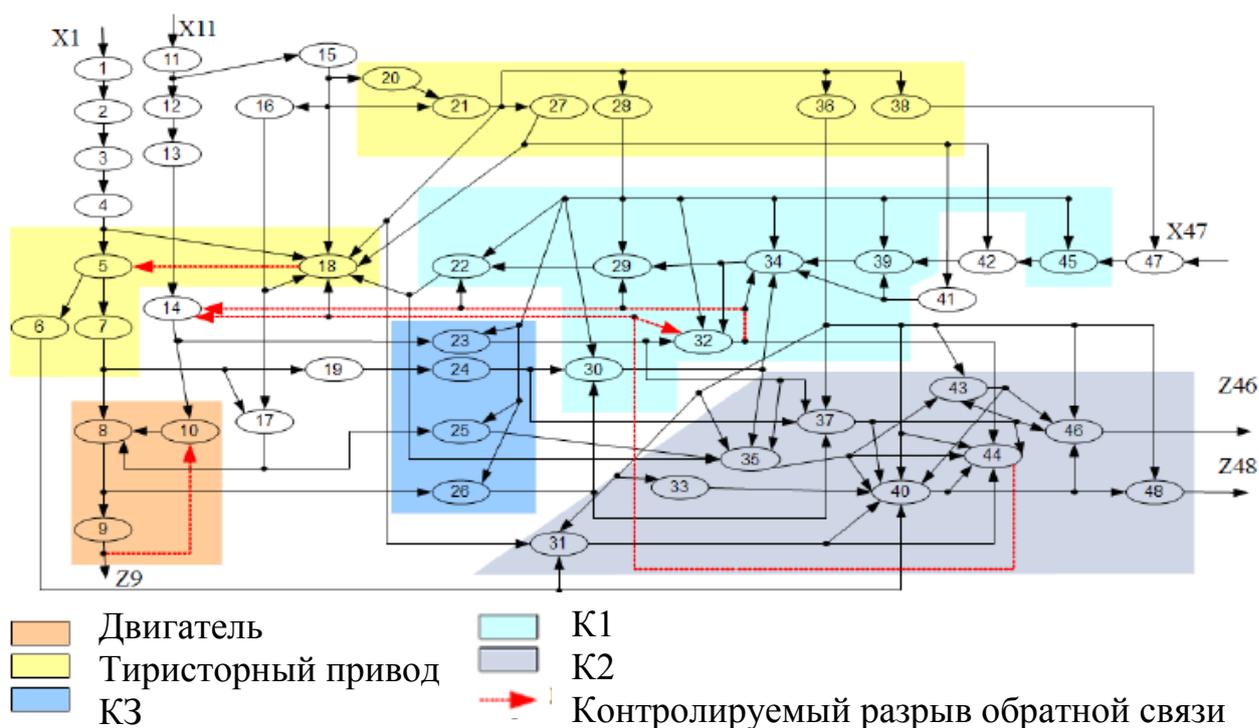


Рис. 6. Граф комплектного электропривода

В качестве точек контроля используется пары входных и выходных сигналов блоков электропривода.

Алгоритм условного поиска дефекта с поиском ошибок КИА позволил обнаружить ошибку КИА, произошедшей во втором диагностическом эксперименте, с помощью тестовых проверок, выполненных в экспериментах 5 и 6 (табл. 1). В шестом диагностическом эксперименте произошла коррекция множества блоков, подозреваемых на наличие дефекта, и процедура поиска была продолжена. В восьмом диагностическом эксперименте был локализован однократный дефект в блоке 35.

Табл.1

№ диагност. эксперимента	выбранная точка контроля	результат тестирования системы	подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефекта
1	(1, 46)	1	{1, 2, 3, 4, 5, 7, 19, 24, 30, 35, 43, 46}
2	(1, 48)	0	{19, 24, 30, 43, 46}
3	(1, 24)	0	{30, 43, 46}
4	(1, 30)	0	{43, 46}
5	(1, 46)	1	{1, 2, 3, 4, 5, 7, 19, 24, 30, 35, 43, 46}
6	(1, 48)	1	{1, 2, 3, 4, 5, 7, 35}
7	(1, 18)	0	{5, 7, 35}
8	(1, 9)	0	{35}

Для рассматриваемого в примере комплектного электропривода был проведен сравнительный анализ алгоритмов с исправлением и без исправления ошибок КИА по времени, затрачиваемого на локализацию дефекта и по вероятности того, что дефект не будет обнаружен при диагностировании системы. В качестве исходных данных методом статистического моделирования было сгенерировано 1000 состояний системы с однократным дефектом и 1000 состояний системы с двукратным дефектом. Вероятность появления ошибки КИА равна 0.01.

Алгоритм условного поиска дефектов с исправлением ошибок КИА, затрачивает больше времени на локализацию дефектов в системе. Это объясняется тем, что алгоритму требуется дополнительное время для поиска ошибок КИА, если есть подозрение на их наличие (рис. 7).

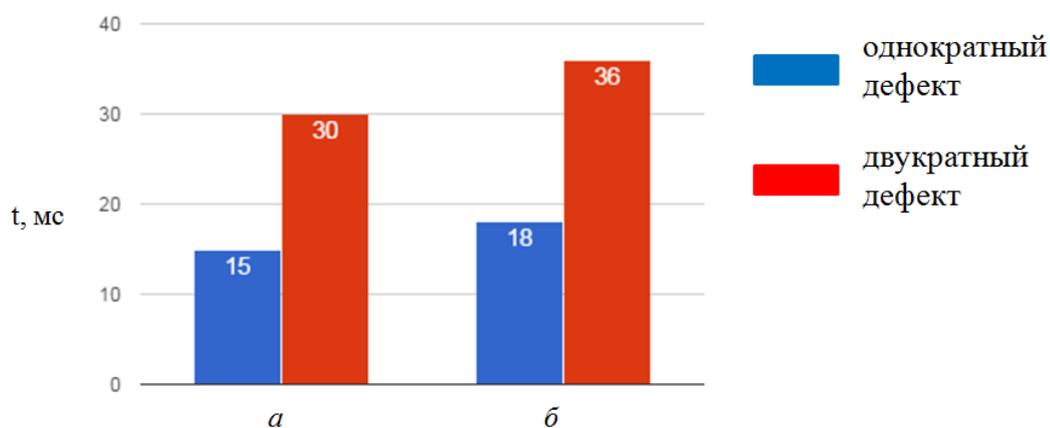


Рис. 7. Среднее время локализации дефекта (в миллисекундах) :
а – алгоритм условного поиска дефектов без исправления ошибок КИА
б – алгоритм условного поиска дефектов с исправлением ошибок КИА

В случае диагностирования системы с однократным дефектом алгоритм без исправления ошибок КИА пропускает дефект с вероятностью появления ошибки КИА (рис. 8, а).

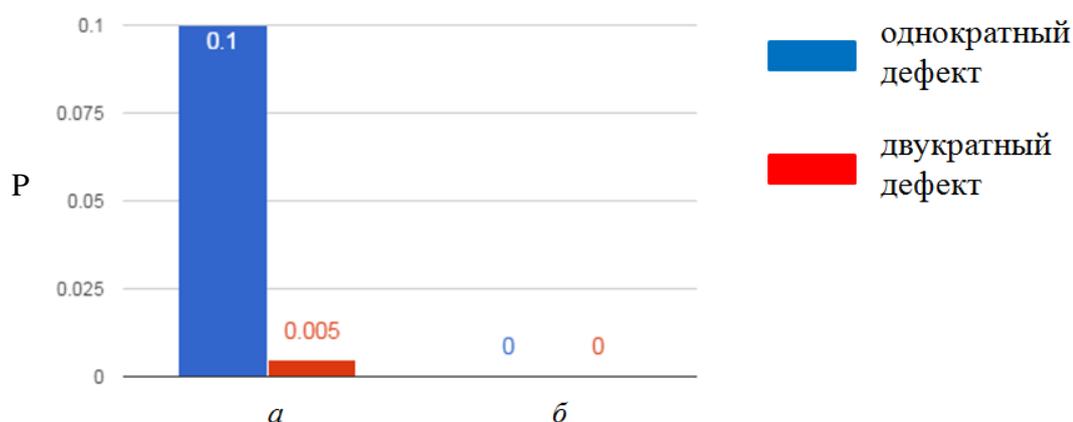


Рис. 8. Вероятность пропуска дефекта:

а – алгоритм условного поиска дефектов без исправления ошибок КИА

б – алгоритм условного поиска дефектов с исправлением ошибок КИА

Таким образом, ошибка КИА гарантированно приводит к получению неверного результата при диагностировании системы с однократным дефектом. При использовании алгоритма без исправления ошибок КИА для диагностирования системы с кратным дефектом, вероятность получения неверного результата меньше, чем при использовании данного алгоритма для поиска однократного дефекта. В случае многократного дефекта ошибка КИА приводит к получению неверного результата только в случае, если ошибка произошла при измерении параметра в точке контроля, которая определяет состояния всех неисправных блоков.

Алгоритм условного выбора точек контроля позволил определить ошибки КИА, и, тем самым, локализовать все однократные и двукратные дефекты в системе (рис. 8, б).

II. Радиотехнические системы (на примере метеорадиолокатора)

Граф причинно-следственных связей основных параметров метеорадиолокатора представлен на рис. 9.

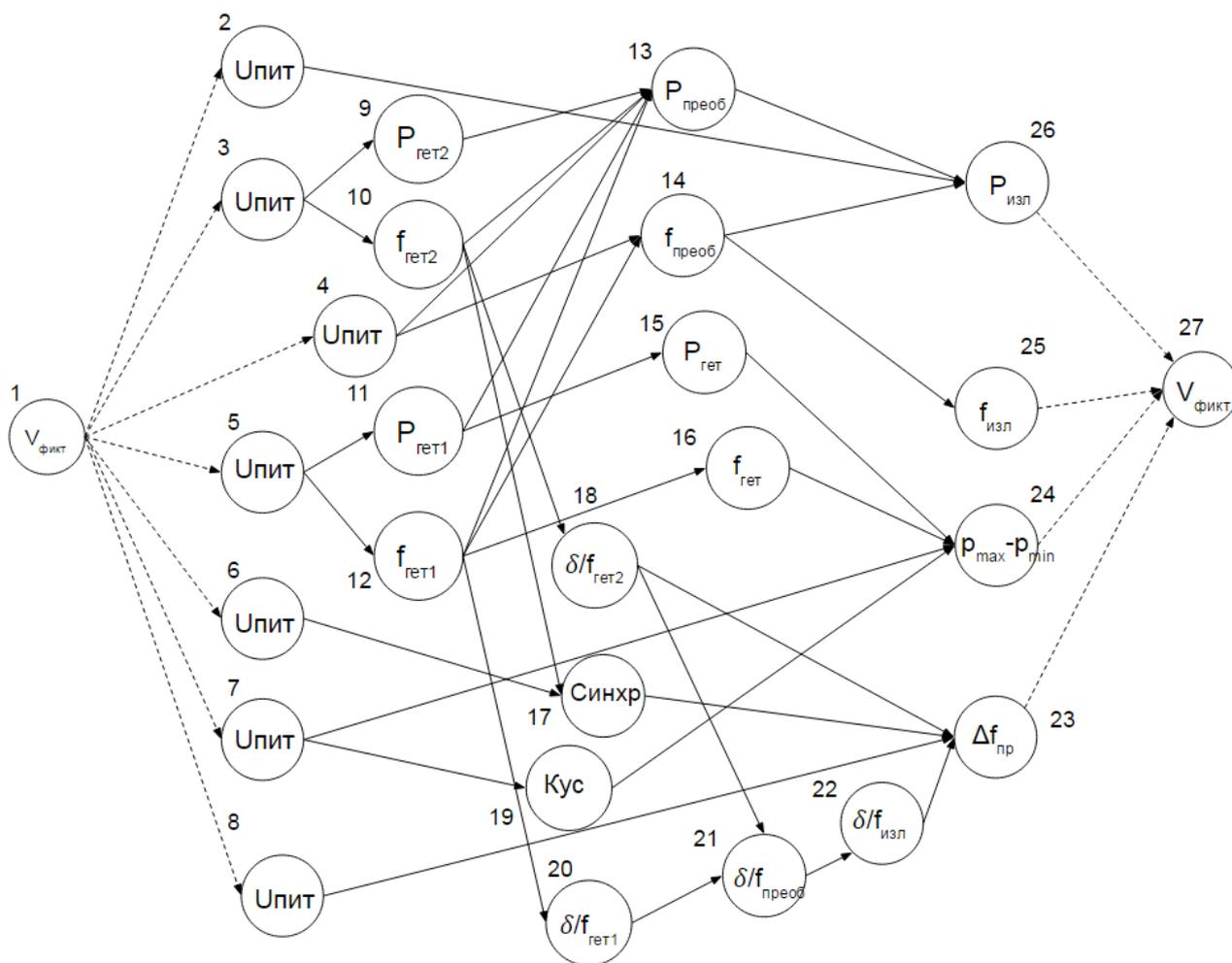


Рис. 9. Граф причинно-следственных связей метеорадиолокатора

Допустим, что вероятности отказа блоков системы равны и составляют 0.01. Также предположим, что в процессе диагностирования системы возможно снимать сигнал на выходе любого блока.

Результат работы условного алгоритма

Предположим, что в процессе эксплуатации в системе произошел однократный дефект в 11 блоке. Результаты работы условного алгоритма представлены в табл. 2.

Табл. 2.

№ диагностич. эксперимента	выбранная точка контроля	результат тестирования системы	подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефекта
1	(5, 23)	0	{2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 26}
2	(3, 26)	0	{2, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25}

3	(4, 25)	0	{2, 6, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 24}
4	(5, 24)	1	{11, 15, 24}
5	(15, 24)	0	{11}

По результатам работы условного алгоритма были использованы точки контроля (5, 23), (3, 26), (4, 25), (5, 24), (15, 24). Результаты диагностических экспериментов с использованием данных точек контроля позволили обнаружить неисправный блок 11.

Результат работы условного алгоритма с поиском ошибок КИА
Рассмотрим работу условного алгоритма с поиском ошибок КИА. Предположим, что в процессе эксплуатации в системе произошел однократный дефект в блоке 13. Зададим количество отрицательных результатов проверок m , указывающее на возможность наличия ошибки КИА, равным 3. Во время второго диагностического эксперимента произошла ошибка КИА: неисправный блок 13 был исключен из подмножества блоков, подозреваемых на наличие дефекта. Результаты работы алгоритма условного поиска дефектов с исправлением ошибок КИА представлены в табл. 3.

Табл. 3.

№ диагностич. эксперимента	выбранная точка контроля	результат тестирования системы	подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефекта
1	(5, 23)	0	{2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 26}
2	(3, 26)	0	{2, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25}
3	(4, 25)	0	{2, 6, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 24}

Результаты трех подряд идущих экспериментов оказались отрицательными: этот факт допускает возможность появления ошибки КИА при диагностировании системы. С целью опровержения или подтверждения факта наличия ошибки КИА выполняется процедура поиска ошибок КИА с помощью тестовых проверок (табл. 4).

Табл.4.

№ диагностич. эксперимента	выбранная точка контроля	результат тестирования системы	подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефекта
4	(5, 23)	0	{2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 26}
5	(3, 26)	1	{3, 9, 13, 26}

Результат пятого диагностического эксперимента с использованием точки контроля (3, 26) отличается от результата второго эксперимента с использованием этой точки контроля. Разница результатов второго и пятого экспериментов подтверждает факт наличия ошибки КИА.

Коррекция ошибки КИА осуществляется посредством замены множества {2, 6, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 24} множеством {3, 9, 13, 26}, которое было исключено ошибочным результатом диагностического эксперимента. После коррекции множества блоков, подозреваемых на наличие дефекта, процедура поиска дефекта продолжается.

Пример статистического моделирования неисправного состояния системы

В процессе диагностирования выполняется моделирование неисправных состояний системы с целью оценки количества информации, которое доставляет эксперимент.

Рассмотрим пример моделирования состояния метеорадиолокатора с трехкратным дефектом. Вероятности отказа блоков системы p_i , $i = \overline{1,27}$ известны априорно (табл. 5).

Табл. 5.

номер блока i	p_i	$p_{27}(i)$	$p_i(1)$	$p_i(2)$	$p_i(3)$	состояние системы
1	0	0.71	0	0	0	0
2	0.01	0.23	$14.5 \cdot 10^{-3}$	$15.2 \cdot 10^{-3}$	-	1
3	0.03	0.05	$44.5 \cdot 10^{-3}$	-	-	1
4	0.04	0.007	$60 \cdot 10^{-3}$	$62.8 \cdot 10^{-3}$	$63.7 \cdot 10^{-3}$	1
5	0.01	$7.8 \cdot 10^{-4}$	$14.5 \cdot 10^{-3}$	$15.2 \cdot 10^{-3}$	$15.5 \cdot 10^{-3}$	0
6	0.02	$6.8 \cdot 10^{-5}$	$29.4 \cdot 10^{-3}$	$30.7 \cdot 10^{-3}$	$31.2 \cdot 10^{-3}$	0
7	0.05	$4.7 \cdot 10^{-6}$	$75.8 \cdot 10^{-3}$	$79.3 \cdot 10^{-3}$	$80.5 \cdot 10^{-3}$	0
8	0.02	$2.7 \cdot 10^{-7}$	$29.4 \cdot 10^{-3}$	$30.7 \cdot 10^{-3}$	$31.2 \cdot 10^{-3}$	0
9	0.01	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$14.5 \cdot 10^{-3}$	$15.2 \cdot 10^{-3}$	$15.5 \cdot 10^{-3}$	0

10	0.05	$4.9 \cdot 10^{-10}$	$75.8 \cdot 10^{-3}$	$79.3 \cdot 10^{-3}$	$80.5 \cdot 10^{-3}$	0
11	0.03	$1.6 \cdot 10^{-11}$	$44.5 \cdot 10^{-3}$	$46.6 \cdot 10^{-3}$	$47.3 \cdot 10^{-3}$	0
12	0.02	$4.5 \cdot 10^{-13}$	$29.4 \cdot 10^{-3}$	$30.7 \cdot 10^{-3}$	$31.2 \cdot 10^{-3}$	0
13	0.01	$1 \cdot 10^{-14}$	$14.5 \cdot 10^{-3}$	$15.2 \cdot 10^{-3}$	$15.5 \cdot 10^{-3}$	0
14	0.03	$2.1 \cdot 10^{-16}$	$44.5 \cdot 10^{-3}$	$46.6 \cdot 10^{-3}$	$47.3 \cdot 10^{-3}$	0
15	0.04	$3.4 \cdot 10^{-18}$	$60 \cdot 10^{-3}$	$62.8 \cdot 10^{-3}$	$63.7 \cdot 10^{-3}$	0
16	0.01	$4.8 \cdot 10^{-20}$	$14.5 \cdot 10^{-3}$	$15.2 \cdot 10^{-3}$	$15.5 \cdot 10^{-3}$	0
17	0.02	$5.6 \cdot 10^{-22}$	$29.4 \cdot 10^{-3}$	$30.7 \cdot 10^{-3}$	$31.2 \cdot 10^{-3}$	0
18	0.05	$5.4 \cdot 10^{-24}$	$75.8 \cdot 10^{-3}$	$79.3 \cdot 10^{-3}$	$80.5 \cdot 10^{-3}$	0
19	0.02	$4.2 \cdot 10^{-26}$	$29.4 \cdot 10^{-3}$	$30.7 \cdot 10^{-3}$	$31.2 \cdot 10^{-3}$	0
20	0.01	$2.6 \cdot 10^{-28}$	$14.5 \cdot 10^{-3}$	$15.2 \cdot 10^{-3}$	$15.5 \cdot 10^{-3}$	0
21	0.05	$1.3 \cdot 10^{-30}$	$75.8 \cdot 10^{-3}$	$79.3 \cdot 10^{-3}$	$80.5 \cdot 10^{-3}$	0
22	0.03	$4.8 \cdot 10^{-33}$	$44.5 \cdot 10^{-3}$	$46.6 \cdot 10^{-3}$	$47.3 \cdot 10^{-3}$	0
23	0.02	$1.2 \cdot 10^{-35}$	$29.4 \cdot 10^{-3}$	$30.7 \cdot 10^{-3}$	$31.2 \cdot 10^{-3}$	0
24	0.01	$2 \cdot 10^{-38}$	$14.5 \cdot 10^{-3}$	$15.2 \cdot 10^{-3}$	$15.5 \cdot 10^{-3}$	0
25	0.05	$1.6 \cdot 10^{-41}$	$75.8 \cdot 10^{-3}$	$79.3 \cdot 10^{-3}$	$80.5 \cdot 10^{-3}$	0
26	0.03	0	$44.5 \cdot 10^{-3}$	$46.6 \cdot 10^{-3}$	$47.3 \cdot 10^{-3}$	0
27	0	0	0	0	0	0

Таким образом, в ходе работы процедуры было смоделировано состояние системы с трехкратным дефектом в 3, 2, 4 блоках.

В заключении изложены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в настоящей работе, были получены следующие научные и практические результаты:

1. Проведен анализ существующих методов диагностирования технических систем, выявлены их достоинства, недостатки и область применения.
2. Обоснована целесообразность использования информационного критерия при поиске дефектов с учетом ошибок КИА.
3. Обоснована целесообразность использования концепции скрытого параметра, позволяющая интерпретировать ошибки КИА как скрытые параметры процесса диагностирования.
4. На основе информационного критерия и концепции скрытого параметра разработана диагностическая модель сложной системы, позволяющая учитывать воздействие ошибок КИА на процесс диагностирования. Разработанная диагностическая модель включает в себя алгоритм условного выбора точек контроля

с учетом ошибок КИА и алгоритм статистического моделирования неисправного состояния систем.

5. Выполнена программная реализация разработанных алгоритмов.

6. Проведен анализ результатов экспериментальных исследований.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ворон, А.М. Информационный синтез контролепригодных систем с учетом ошибок контрольно-измерительной аппаратуры [Текст]/ Л.С. Ломакина, А.М. Ворон // Журнал «Датчики и системы». – Москва – 2013. – №11. – с. 27-32.

2. Ворон, А.М. Методологические аспекты диагностирования состояний сложных технических систем [Текст]/ Л.С. Ломакина, А.М. Ворон // Журнал «Фундаментальные исследования». – Москва – 2015. – №12(2). – с. 297-300.

3. Ворон, А.М. Диагностирование сложных систем на основе концепции скрытого параметра [Текст]/ Л.С. Ломакина, А.М. Ворон // Журнал «Современные наукоемкие технологии». – Москва – 2016. – №3(1). – с. 50-54.

Монографии, учебники и другие пособия

4. Ломакина, Л.С. Информационные технологии диагностирования сложных технических систем: Монография / Л.С. Ломакина, В.П. Губернаторов. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2013. – глава 3, с. 102-109.

Публикации в других научных изданиях:

5. Ворон, А.М. Диагностирование программного обеспечения на основе информационного критерия [Текст] / А.М. Ворон // V Межвузовский сборник научных трудов "Прикладная информатика и математическое моделирование", 2010 г. – Москва: МГУП. – с. 3-11.

6. Ворон, А.М. Локализация дефектов в сложных системах на основе информационного критерия [Текст] / Д.В. Ломакин, А.А. Иванова, А.М. Ворон // Материалы международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2011)», 18 апреля 2011 г. - Н.Новгород: НГТУ, 2011.- с. 315.

7. Ворон, А.М. Статистическое моделирование в задачах диагностирования сложных систем [Текст] / Д.В. Ломакин, А.М. Ворон // Материалы X Международной научно-технической конференции «Будущее технической науки», 23 мая 2011 г. – Н.Новгород: НГТУ, 2011. – с. 440-441.

8. Ворон, А.М. Диагностирование сложных технических и программных систем [Текст] / Д.В. Ломакин, А.А. Иванова, А.М. Ворон // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева – Н.Новгород: НГТУ, 2011. – №90(3) – с. 83-88.

9. Ворон, А.М. Разработка алгоритмов диагностирования сложных систем на основе информационного критерия [Текст] / А.М. Ворон // VI Межвузовский сборник

научных трудов "Прикладная информатика и математическое моделирование", 2011 г. – Москва: МГУП. – с.6-12.

10. Ворон, А.М. Алгоритм обнаружения и исправления ошибок контрольно-измерительной аппаратуры при диагностировании сложных систем [Текст] / Д.В. Ломакин, А.М. Ворон // Материалы международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2012)», 18 апреля 2012 г. – Н.Новгород: НГТУ, 2012.– с.252.

11. Ворон, А.М. Диагностирование сложных систем с учетом ошибок контрольно-измерительной аппаратуры [Текст] / Д.В. Ломакин, А.М. Ворон // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева – Н.Новгород: НГТУ, 2012. – №96(3) – с. 76-80.

12. Ворон, А.М. Снижение влияния ошибок контрольно-измерительной аппаратуры на результат диагностирования системы [Текст] / А.М. Ворон // VII Межвузовский сборник научных трудов "Прикладная информатика и математическое моделирование", 2012 г. – Москва: МГУП. – с.15-20.

13. Ворон, А.М. Диагностирование сложных технических систем [Текст] (научный руководитель Л.С. Ломакина) / Л.С. Ломакина, Д.В. Ломакин, В.П. Губернаторов и др. // Отчет по НИР № государственной регистрации 131205122130 от 08.12.13. – Н.Новгород: НГТУ. – 100 с.

14. Voron, A.M. Diagnosis of complex technical systems considering instrumentation failures [Текст] / A.M. Voron // Proceedings of the XIX-th International Open Science Conference “Modern informatization problems in simulation and social technologies”, January 2014y. – Lorman, MS, USA: Science Book Publishing House, 2014. – p. 101-103.

15. Voron, A.M. Instrumentation failures detection during complex system diagnosis [Текст] / A.M. Voron // Materials of the III International Scientific Conference “Information-Management Systems and Technologies”, September 2014y. – Odessa, 2014. – p. 187-189.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и баз данных:

16. Ворон, А.М. Визуализация диагностирования сложных систем на основе информационного критерия / Д.В. Ломакин, Иванова А.А., Ворон А.М. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011610230. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности РФ (Роспатент) от 11 января 2011 г.

17. Ворон, А.М. Диагностирование сложных систем с учетом ошибок контрольно-измерительной аппаратуры / Д.В. Ломакин, А.М. Ворон // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012614562. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности РФ (Роспатент) от 22 мая 2012 г.