

## **МОНИТОРИНГ КОМПОНЕНТОВ КОМПЛЕКСА БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЦЕЛЯХ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ**

В.Н. Буков, А.М. Бронников, А.В. Воробьев, А.С. Попов, В.А. Шурман

**Аннотация.** Рассмотрена проблема мониторинга технического состояния компонентов комплекса бортового оборудования с целью его реконфигурирования в реальном времени. Предполагается использование по крайней мере трех уровней систем мониторинга: ближайшая перспектива – исключительно традиционные встроенные средства контроля (ВСК); дальнейшее продвижение – ВСК в совокупности со средствами повышения достоверности выполняемого диагностирования, включая организацию взаимно перекрестного парного мониторинга; более отдаленная перспектива – логические алгоритмы обработки наблюдений за поведением системы в целом, основанные на нормализованных правилах анализа функциональных отказов (АФО) авиационной техники. Математическое содержание парного мониторинга состояния компонентов заключается в формировании так называемых матриц предпочтения, по значению которых посредством специальных таблиц не только определяется с высокой достоверностью состояние объектов диагностирования, но и оцениваются возможные ошибки средств диагностирования. Применительно к методам третьего уровня предложена последовательность действий, заключающаяся в поочередном инициировании обратной и прямой логических моделей, воспроизводящих зависимости отказных состояний по результатам АФО. Предложена обновленная методика работы с триплексными логическими моделями. Основным преимуществом таких моделей является существенная простота и универсальность, что обеспечивает эффективность их применения к широкому кругу динамических систем различной сложности. Приведенный методический пример иллюстрирует применение логических триплексных моделей.

**Ключевые слова:** комплекс бортового оборудования, мониторинг технического состояния, логический парный мониторинг, логические триплексные модели, анализ функциональных отказов, управление избыточностью.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Создание избыточных реконфигурируемых комплексов бортового оборудования (КБО) подвижных объектов является безальтернативным путем достижения предельно возможной надежности этих комплексов в условиях как ограниченной надежности используемых компонентов, так и воздействия широкого спектра внешних факторов. В соответствии с изложенным в работе [1] активный тип парирования отказов или адаптации к отказам в реконфигурируемых системах<sup>1</sup> предполагает совместное функционирование по крайней

мере трех подсистем, одна из которых представляет собой собственно реконфигурируемую или адаптируемую часть оборудования<sup>2</sup> (в нашем случае – оборудования комплекса), вторая осуществляет обнаружение (мониторинг) и диагностирование отказов<sup>3</sup> этого комплекса, а третья реализует так называемый механизм реконфигурирования<sup>4</sup>.

Реконфигурируемость КБО означает наличие в его оборудовании свойств, обеспечивающих возможность целенаправленного изменения в реаль-

<sup>1</sup> Active Fault-Tolerant Control System (AFTCS) – активно отказоустойчивая система управления (система управления с активным парированием отказов).

<sup>2</sup> Reconfigurable Control System (RCS) – реконфигурируемая система управления.

<sup>3</sup> Fault Detection and Diagnosis (FDD) – обнаружение и диагностирование отказов.

<sup>4</sup> Reconfiguration Mechanism (RM) – механизм реконфигурирования (англоязычный термин скорректирован авторами).

ном времени как параметрических, так и структурных его характеристик.

Управление же избыточностью по определению возлагается на вторую и третью упомянутые подсистемы.

Исторически сложилось так, что исследования по мониторингу, диагностированию и реконфигурированию технических систем практически изолированы друг от друга. С одной стороны, известные решения в области мониторинга и диагностирования [2–9] не связаны с последующим использованием их результатов в реальном времени. С другой стороны, авторы подходов к реконфигурированию [10–14] исходят из результатов мониторинга как данности. Такая ситуация обладает очевидными недостатками, поскольку остаются без ответа следующие вопросы: какова действительная необходимость диагностирования в реальном времени, каковы взаимные требования диагностирования и реконфигурирования, как систематически анализировать их взаимодействие и пр.

Тем не менее, пока в научной литературе и практике преобладает раздельное решение проблем мониторинга, диагностирования и реконфигурирования.

Настоящая статья посвящена проблеме мониторинга работоспособности компонентов реконфигурируемого комплекса с ориентацией на его использование в рамках подхода к управлению избыточностью на основе супервизорного способа управления конфигурациями [15]. Здесь рассматривается более широкая постановка – мониторинг готовности КБО, наряду с работоспособностью охватывающий вопросы завершения всех видов подготовки его компонентов в реальном времени к применению по назначению.

## 1. ФУНКЦИИ И ПОКОЛЕНИЯ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА

В развиваемой прикладной теории управления избыточностью [15] перед средствами мониторинга ставится цель определения для каждого доступ-

ного компонента (аппаратного или программного) его индекса готовности (ИГ) и показателя функциональной эффективности (ПФЭ) для использования в периодическом арбитраже конфигураций.

Предполагается, что мониторинг выполняется в три основных шага:

- сбор данных от компонентов либо путем инициализации данных специальными запросами, либо в режиме перехвата трансляции, осуществляемой компонентами самостоятельно;
- обработка данных, включая их первичную математическую обработку, если они поступают от нескольких источников и относятся к одному компоненту, и подготовку результатов (формирование ИГ и ПФЭ) к передаче;
- передача результатов в виде ИГ и ПФЭ на уровень управления избыточностью по запросам супервизоров или путем транслирования по локальной сети с общим доступом.

Предполагается [15], что по мере развития теории и прикладных аспектов могут применяться различные по принципам и алгоритмам методы мониторинга, образующие три основных уровня, сведенные в табл. 1.

Первый уровень мониторинга является базовым и основан исключительно на существующих или вновь создаваемых разработчиками компонентов встроенных средствах контроля (ВСК). Достижимый эффект состоит в обеспечении контроля оборудования в соответствии с отраслевыми нормативными документами, определяющими глубину и качество процедур контроля [16, 17].

Второй уровень предполагает применение, наряду с существующими ВСК, эффективных алгоритмических решений с взаимным контролем резервированных компонентов, имеющих в своем составе ВСК, например, процедур логического парного мониторинга (ЛПМ) [18]. Соответствующая реализация возможна в бортовых автоматизированных системах контроля (БАСК) и системах технического обслуживания (БСТО) [17]. При не-

Таблица 1

Развитие методов мониторинга избыточных КБО

| № | Уровень       | Средства                             | Инструментарий   | Достижимый эффект  |
|---|---------------|--------------------------------------|--|--|
| 1 | Базовый       | Традиционные ВСК                     | Самостоятельное выполнение мониторинга   | Обеспечение контроля оборудования в соответствии с отраслевыми нормативными документами                          |
| 2 | Перспективный | Интеграция с БАСК, использование ЛПМ | Интеграция в архитектуру существующих (разрабатываемых) БАСК (БСТО)  | Более полный и взаимодополняющий контроль оборудования на основе различных технических и алгоритмических решений |
| 3 | Перспективный | Алгоритмы независимого мониторинга   | Применение более сложных алгоритмов и стратегий мониторинга (логические модели, прогнозирование состояния) | Качественно новый уровень и высокая достоверность контроля, обнаружение и диагностирование множественных отказов |



однородности<sup>5</sup> объектов контроля и их ВСК может быть получен эффект максимально достоверной оценки работоспособности функциональной части компонентов и работы самих ВСК.

На третьем уровне предполагается применение более сложных, а главное, не зависящих от ВСК алгоритмов и стратегий мониторинга, основанных на анализе процессов, протекающих в системе «объект + КБО», с использованием разнообразных концепций и моделей, в том числе с прогнозированием состояния. В частности, речь может идти о логических моделях на основе так называемых направленных триплексных графов [19].

## 2. МОНИТОРИНГ НА ОСНОВЕ ВСТРОЕННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ

Встроенные средства контроля представляют собой совокупность аппаратных или программных компонентов, специально вводимых в состав систем или комплектующих изделий, функциональных узлов (ФУз). Они, как правило, не участвуют в работе функциональных модулей (ФМ) системы или ее ФУз по назначению, а собирают и обобщают различные данные, объективно отражающие, по мнению разработчика, работоспособность этих модулей.

Применяются два существенно различных подхода к организации работы ВСК:

- тестовый контроль работоспособности аппаратуры, сопряженный с необходимостью и возможностью временного «изъятия» объекта контроля из процесса функционирования по назначению;

- функциональный контроль, производимый в процессе функционирования объекта контроля по назначению.

Реализация функционального контроля базируется обычно на применении двух основных принципов:

- *Использование различных схем голосования.* Распространенным вариантом являются так называемые кворум-элементы (КЭ), выделяющие неисправные модули на основе обработки результатов голосования нескольких подключенных ФМ. Суждение о работоспособности ФМ делается на основе значительного (наибольшего или превышающего пороговое значение) отклонения его выхода от других однотипных модулей [20].

Основные особенности метода кворумирования включают:

- предположение о неизменности технического состояния ФМ в пределах цикла;

- предположение о том, что КЭ может быть только исправным;

- применимость к числу ФМ, превышающему 2 (при двух ФМ объектом оценки работоспособности становится пара ФМ, а не каждый ФМ в отдельности);

- предположение о том, что с учетом правил голосования (равноправное, взвешенное, с дискриминациями и пр.) исправные ФМ внутри каждого цикла доминируют над неисправными и реализована возможность отключения неисправных;

- общий поток данных для всех ФМ.

Своеобразная форма голосования широко реализуется в так называемых самопроверяемых системах [9], в которых совокупность однотипных модулей, подверженных одинаковым входным воздействиям, разбивается на пары, и выходы внутри каждой пары сравниваются между собой. Пара с совпадающими выходами считается работоспособной, в противном случае оба модуля пары полагаются неработоспособными.

- *Использование правил достоверности (ПД).* В зависимости от конкретных условий и решений в качестве таких правил могут выступать: сравнение с эталонными моделями, фиксирование нарушений заданных временных и (или) параметрических интервалов (контроль по допуску на параметр [20]), проверка логических и др. соотношений, вычисление инвариантов разных порядков и пр.

Основные особенности метода использования ПД:

- в пределах цикла работоспособность ФМ не изменяется;

- предполагается, что элемент, реализующий правила достоверности, может быть только работоспособным, в том числе при наличии эталонной модели она может быть только работоспособной;

- применимость к любому числу ФМ;

- предполагается, что входные и выходные данные в достаточной степени информативны;

- каждый ФМ имеет свой поток данных.

Мониторинг технического состояния вычислительных блоков в центральной вычислительной системе КБО организуется на основе комплексного применения указанных выше методов.

В соответствии со спецификацией стандарта ARINC 653 монитор состояния (Health Monitor) представляет собой системную функцию, отвечающую за мониторинг ошибок в работе аппаратных средств, прикладного программного обеспечения и операционной системы и передачу соответствующих сообщений. Конечный сбор информации о

<sup>5</sup> Узлы одинакового предназначения созданы различными разработчиками и (или) на основе различных технических решений.

техническом состоянии вычислителя в процессе штатной работы выполняется механизмами ядра операционной системы и (или) специальным разделом системного ПО.

Результирующая информация монитора состояния передается в БСТО и в каналы связи с наземными средствами либо обрабатывается операционной системой. Входными данными для формирования этой информации являются:

- результаты работы тестов встроенного контроля, проверяющих работоспособность аппаратуры в фоновом режиме в специально выделяемые временные интервалы;
- выходные данные программных обработчиков «особых случаев», обнаруживаемых аппаратными средствами в процессе выполнения функциональных приложений и представляющих собой обычно фиксацию результатов ошибок программирования либо протокольных нарушений при приеме данных во входных каналах внешнего интерфейса;
- информация функциональных приложений об ошибках, некорректности входных или выходных данных.

Несколько особняком стоит недавно возникшее направление [21], которое можно назвать мониторингом ФМ по его эксплуатационным данным. Подразумевается, что непосредственно с ФМ конструктивно и функционально связан специальный элемент (чип), собирающий и накапливающий данные об условиях его использования и хранения. В число параметров, хранимых и выдаваемых таким чипом в модуль мониторинга, входят различные данные о ФМ, включая:

- паспортные данные,
- результаты испытаний на разных стадиях жизненного цикла,
- статистику эксплуатационных показателей и характеристик (оценки достигаемой точности, остаток ресурса, энергетические показатели и пр.),
- статистику внешних воздействий во время использования по назначению, при хранении и регламентных работах.

На модуль мониторинга возлагается анализ поступающих данных и формирование на основе этого анализа суждения о возможной работоспособности ФМ.

Подводя итог, можно отметить в разной степени распространенные особенности (ограничения) ВСК:

- наличие слабых<sup>6</sup> предположений о неизменности работоспособности проверяемых устройств внутри цикла мониторинга;

<sup>6</sup> Удовлетворение предположения не влияет на практическое применение подхода.

- наличие сильных<sup>7</sup> предположений о работоспособности систем контроля или их основных устройств,

- ограничение минимального или требование большого числа ФМ (для случая кворумирования или мажоритарного контроля),

- требование доминирования работоспособных ФМ над неработоспособными,

- возможность оперативного отключения неисправных ФМ,

- требование информативности процессов в ФМ.

Основное же преимущество непосредственного использования ВСК (как есть) для мониторинга компонентов в избыточном КБО заключается в отлаженности технологий их создания и практического применения.

Интенсивно развиваются аналитические методы мониторинга и диагностирования [5–7], развивающие концепцию правил достоверности и основанные на использовании теоретических закономерностей и особенностей функционирования динамических систем.

### 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКОГО ПАРНОГО МОНИТОРИНГА

Общим недостатком использования ВСК является вынужденное доверие этим средствам диагностирования, т. е. априорное предположение об их непогрешимости [22–24]. Проведенные исследования [15] показали, что без учета неизбежной ограниченности возможностей средств контроля (мониторинга) реально достигаемая отказоустойчивость может значительно уступать ожиданиям.

Такое положение можно исправить путем применения процедур логического парного мониторинга (ЛПМ) [18], заключающегося в том, что для двух контролируемых ФМ одного функционального назначения осуществляется как автономный, так и взаимно перекрестный мониторинг. Предполагается, что все сопоставимые по назначению и принципам функционирования конструктивно обособленные функциональные узлы «ФМ + ВСК» сконструированы таким образом, что ВСК каждого из них может получить доступ к ФМ любого другого узла<sup>8</sup>, что иллюстрирует рис. 1.

<sup>7</sup> Удовлетворение предположения значительно сужает прикладные возможности подхода.

<sup>8</sup> Реализация такого предложения в полном объеме может столкнуться с существенными трудностями, однако в качестве компромисса по усмотрению разработчика может осуществляться ограниченный доступ.

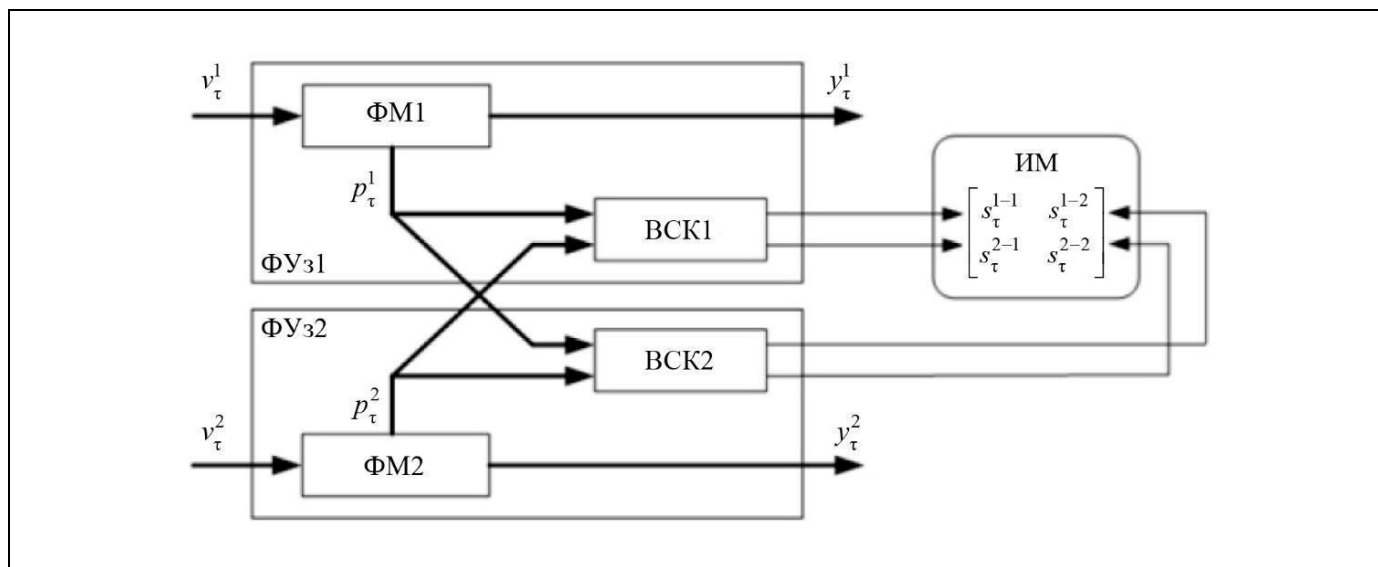


Рис. 1. Схема соединения функциональных узлов для осуществления ЛПМ

На рис. 1 использованы обозначения:  $\tau$  – текущее время (номер цикла мониторинга);  $v_\tau$  – входные данные;  $y_\tau$  – выходные данные;  $p_\tau$  – контролируемые параметры (которые могут включать  $v_\tau$  и  $y_\tau$ );  $s_\tau^{i-j}$  – оценка работоспособности  $i$ -го ФМ, сформированная  $j$ -м ВСК. Бинарные оценки работоспособности (1 – работоспособен, 0 – неработоспособен) образуют индикаторную матрицу (ИМ).

Мониторинг осуществляется в условиях предположений:

- Потоки однотипных данных через различные ФМ не связаны между собой (функциональная автономность ФМ).

- Каждый функциональный узел ФМ + ВСК выполнен на технологической базе и поддерживается инфраструктурными средствами, не зависящими от базы и средств других ФУз (техническая разнородность ФУз).

- ФМ могут быть независимо работоспособными или неработоспособными (независимость работоспособности ФМ).

- Только один в паре ВСК может допускать простую ошибку: ошибочную оценку «работоспособен» или «неработоспособен» (безошибочность работы хотя бы одного ВСК).

- Процесс мониторинга разбит на циклы, внутри которых работоспособность ФМ и ошибки ВСК неизменны (стационарность работоспособности ФУз).

В работе [18] показано, что при справедливости этих предположений полная группа различных значений ИМ составляет 13 матриц, однозначно связанных с работоспособным или неработоспособным состоянием обоих ФУз. Причем в соответствии с индикаторным правилом ЛПМ, компактно отражаемым табл. 2 [18], каждое значение ИМ однозначно определяет техническое состояние как каждого ФМ, так и каждого ВСК. Исключение составляет значение ИМ

$$S_\tau^{\text{инд}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

которому может соответствовать работоспособность обоих ФУз или неработоспособность одного из ВСК в виде выдачи ложного значения оценки «исправен». Но эта неоднозначность не касается утверждения об исправности ФМ, а в части ВСК может быть учтена конструктивными решениями.

Опубликован [25] также более сложный вариант ЛПМ, учитывающий возможное наличие так называемой серой зоны (СЗ), образующейся, когда какая-то часть ВСК, участвующая в выполнении мониторинга, в смысле прохождения данных не может быть отделена от ФМ. Тогда при формировании ЛПМ рассекать ВСК приходится по границе между СЗ и аналитическим сегментом (АС). Это приводит к модификации индикаторного правила и в целом к снижению результативности мониторинга: работоспособность СЗ сливается (неразличимо) с работоспособностью ФМ, идентификация ошибок относится исключительно к АС.

**Значения ИМ, получаемые в результате ЛПМ**

| Неработоспособность ФМ  | Ошибки в работе ВСК                            |  |  |  |  |
|-------------------------|--|--|--|--|--|
|                         | Ошибки в работе ВСК1                           |  | Ошибки в работе ВСК2                           |  | Отсутствуют                                    |
|                         | Ложная «1»                                     | Ложный «0»                                     | Ложная «1»                                     | Ложный «0»                                     |  |
| Неработоспособность ФМ1 | $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ |
| Неработоспособность ФМ2 | $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ |
| Отсутствует             | –  | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ | –  | $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ |

#### 4. ФОРМИРОВАНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В работах [20, 26] предложен подход к контролю работоспособности технических систем на основе логических моделей. Суть такого подхода применительно к мониторингу компонентов в комплексе с управляемой избыточностью заключается в следующем.

В соответствии с изложенным в работе [27] разработчиком КБО выполняется анализ функциональных отказов (АФО). К таким отказам относятся полное прекращение функционирования, утрата способности удовлетворять предъявляемым требованиям, прерывистое функционирование, функционирование без необходимости и др. Результатом анализа являются перечни (с описанием взаимосвязей) видов конкретных отказов техники, приводящие к функциональным отказам (с описанием последствий). В большинстве случаев принято разделять последствия отказа на местные, т. е. характерные для самого изделия, его проявление на следующем вышестоящем уровне и на высшем уровне системы в целом, например, летательного аппарата и т. п. Выявление последствий отказа на высшем уровне необходимо для сравнительной оценки критичности отказов всех компонентов, входящих в КБО. Обычно результаты АФО представляют в виде таблиц возможных отказов и их последствий.

Анализ функциональных отказов может быть не всеобъемлющим, а выполненным частично с

учетом критичности отказов различных частей систем.

Излагаемый подход предполагает переход от описательных (качественных) результатов АФО к построению двух видов формализованных логических моделей распространения отказов в объекте диагностирования (ОД) с триплексными переменными: 0 – отсутствие отказа или его влияния, 1 – наличие отказа или его влияния, & – состояние не определено.

Методика построения и использования триплексных моделей, изложенная в работах [20, 26], обладает невысоким уровнем формализации (система правил решения), что создавало трудности ее практического применения. Ниже предлагается более глубокий в методическом плане подход, в значительной части лишенный указанного недостатка.

Распространение влияния отказов (от причин к проявлениям) в КБО предлагается моделировать посредством логической сети (ЛС), содержащей обобщенные элементы с логическим оператором  $OR_i$  (аналог дизъюнкции) или  $AND_i$  (аналог конъюнкции) на входе и оператором  $OR_o$  или  $AND_o$  на выходе, как это показано на рис. 2. При этом состояние элемента  $x_{id}$  определяется значениями триплексных переменных на его входах  $x_{in}^j$  в соответствии с формулами, содержащими правые стрелки «от причины к следствию»:  $x_{in}^1 + x_{in}^2 \rightarrow x_{id}$  для оператора  $OR_i$  или  $x_{in}^1 \times x_{in}^2 \rightarrow x_{id}$  для оператора  $AND_i$ , и определяет значение таких перемен-

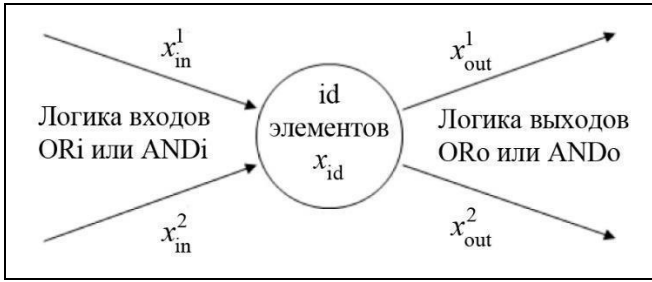


Рис. 2. Элемент логической сети (модели распространения влияния отказов в КБО)

ных на выходах:  $x_{id} \rightarrow x_{out}^1 + x_{out}^2$  для оператора ORo или  $x_{id} \rightarrow x_{out}^1 \times x_{out}^2$  для оператора ANDo. Оператор ORo должен снабжаться описанием условий переключения выходов (по внешнему воздействию, по определенным признакам состояния ЛС или др.).

Важное обстоятельство: при построении ЛС путем искусственного расчленения моделей реальных устройств требуется добиваться того, чтобы каждому ее элементу соответствовали не более одного входного и не более одного выходного оператора.

Следует обратить внимание на то, что арифметика работы с предложенными триплексными переменными не является общепринятой, а каждый переход между элементами предложенной ЛС от причины к следствию (прямая логическая модель) выполняется по правилам, сведенным в табл. 3. Дополнительно введенный символ  $\nabla$ , который будем тоже называть оператором, соответствует отсутствию альтернативы.

Так, формулы в ячейках 1-2 (строка 1, столбец 2) и 1-4 следует читать: «наличие хотя бы одного сигнала  $x_{in}^j = 1$  (влияние отказа) на входах элемента ЛС с логикой ORi приводит этот элемент к состоянию  $x_{id} = 1$  (подвержен влиянию отказа)». Это соответствует развитию отказного состояния в нерезервированных функциональных устройствах КБО. Ячейки же строки 2 связаны с логикой ANDi, характерной для резервированных устройств.

Ячейки, выделенные в табл. 3 желтым цветом, определяют распространение неопределенности & по триплексной ЛС. Остальные ячейки отражают однозначное развитие ситуации: распространение (1) или не распространение (0) влияния отказов.

Процесс анализа отказов системы связан с обратной логикой, определяющей переходы от проявлений отказов к их причинам. Соответствующие переходы (обратная логическая модель, левые стрелки «от следствия к причине»)  $x_{in}^1 + x_{in}^2 \leftarrow x_{id}$ ,  $x_{in}^1 \times x_{in}^2 \leftarrow x_{id}$  и  $x_{id} \leftarrow x_{out}^1 \times x_{out}^2$  представлены в табл. 4, где, например, формула в ячейке 2-1 читается как «состояние  $x_{id} = 1$  элемента с оператором ANDi явилось следствием одновременного наличия 1 на его входах».

Обратная логика применяется, когда известен выход и нужно сделать суждение о входе. Для операторов на входе – по состоянию элемента определить возможные комбинации на его входе, а для операторов на выходе – по комбинации на выходе определить состояние элемента ЛС.

Таблица 3

**Арифметика прямой логики**

| Операторы и номера строк |   | Номера столбцов и формулы  |                            |                              |                            |                            |                             |                               |                             |                               |
|--------------------------|---|----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                          |   | 1                          | 2                          | 3                            | 4                          | 5                          | 6                           | 7                             | 8                           | 9                             |
| ORi                      | 1 | $1 + 1 \rightarrow 1$      | $1 + 0 \rightarrow 1$      | $1 + \& \rightarrow 1$       | $0 + 1 \rightarrow 1$      | $0 + 0 \rightarrow 0$      | $0 + \& \rightarrow \&$     | $\& + 1 \rightarrow 1$        | $\& + 0 \rightarrow \&$     | $\& + \& \rightarrow \&$      |
| ANDi                     | 2 | $1 \times 1 \rightarrow 1$ | $1 \times 0 \rightarrow 0$ | $1 \times \& \rightarrow \&$ | $0 \times 1 \rightarrow 0$ | $0 \times 0 \rightarrow 0$ | $0 \times \& \rightarrow 0$ | $\& \times 1 \rightarrow \&$  | $\& \times 0 \rightarrow 0$ | $\& \times \& \rightarrow \&$ |
| ORo                      | 3 | –                          | $1 \rightarrow 1 + 0$      | –                            | $1 \rightarrow 0 + 1$      | $0 \rightarrow 0 + 0$      | $\& \rightarrow 0 + \&$     | –                             | $\& \rightarrow \& + 0$     | –                             |
| ANDo                     | 4 | $1 \rightarrow 1 \times 1$ |                            |                              | $0 \rightarrow 0 \times 0$ |                            |                             | $\& \rightarrow \& \times \&$ |                             |                               |
| $\nabla$                 | 5 | $1 \rightarrow 1$          |                            |                              | $0 \rightarrow 0$          |                            |                             | $\& \rightarrow \&$           |                             |                               |

**Арифметика обратной логики**

| Операторы и номера строк |   | Номера столбцов и формулы |   |  |
|--------------------------|---|---------------------------|---|--|
|                          |   | 1                         | 2   | 3  |
| rORi                     | 1 | $0 + 0 \leftarrow 0$      | $(1 + 1 \leftarrow 1 \text{ или } 1 + 0 \leftarrow 1 \text{ или } 0 + 1 \leftarrow 1 \text{ или } *) * 1 + \& \leftarrow 1$<br>или $\& + 1 \leftarrow 1$                          | $0 + \& \leftarrow \& \text{ или } \& + 0 \leftarrow \& \text{ или } \& + \& \leftarrow \&$                |
| rANDi                    | 2 | $1 \times 1 \leftarrow 1$ | $(0 \times 0 \leftarrow 0 \text{ или } 1 \times 0 \leftarrow 0 \text{ или } 0 \times 1 \leftarrow 0 \text{ или } *) * 0 \times \& \leftarrow 0$<br>или $\& \times 0 \leftarrow 0$ | $1 \times \& \leftarrow \& \text{ или } \& \times 1 \leftarrow \& \text{ или } \& \times \& \leftarrow \&$ |
| rORo                     | 3 | $0 \leftarrow 0 + 0$      | $1 \leftarrow 1 + 1 \text{ или } 1 \leftarrow 1 + 0 \text{ или } 1 \leftarrow 0 + 1 \text{ или } 1 \leftarrow 1 + \&$<br>или $1 \leftarrow \& + 1$                                | $\& \leftarrow 0 + \& \text{ или } \& \leftarrow \& + 0 \text{ или } \& \leftarrow \& + \&$                |
| rANDo                    | 4 | $1 \leftarrow 1 \times 1$ | $0 \leftarrow 1 \times 0 \text{ или } 0 \leftarrow 0 \times 1 \text{ или } 0 \leftarrow 0 \times 0 \text{ или } 0 \leftarrow \& \times 0$<br>или $0 \leftarrow 0 \times \&$       | $\& \leftarrow 1 \times \& \text{ или } \& \leftarrow \& \times 1 \text{ или } \& \leftarrow \& \times \&$ |
| $\nabla$                 | 5 | $1 \leftarrow 1$          | $0 \leftarrow 0$  | $\& \leftarrow \&$   |

\* Если понятие «неопределенный» отождествлять с понятием «любой», то формулы в скобках следует игнорировать.

Обоснование приведенных в табл. 4 формул иллюстрируется следующими пояснениями к строке 4:

а) если установлено, что на выходах элемента ЛС имеет место комбинация 1 и 1 (оба подвержены влиянию отказа), то в силу логики оператора AND данный элемент подвержен влиянию отказа;

б) если установлено, что на выходах имеет место комбинация 1 и 0 (один из выходов подвержен влиянию отказа, а другой нет), то это соответствует отсутствию влияния отказа на рассматриваемый элемент, а отказ возник в цепочке элементов, следующей за выходом со значением 1;

в) если установлена комбинация 0 и 1, то результат аналогичен п. б);

г) если установлена комбинация 0 и 0, то элемент не подвержен влиянию отказа;

д) если установлена комбинация & и 0, то при любом значении & (по п. а или в) элемент не подвержен отказу;

е) если установлена комбинация 0 и &, то результат аналогичен п. д);

ж) если установлена комбинация & и &, то элемент находится в неопределенном состоянии;

з) если установлена комбинация & и 1, то элемент находится в неопределенном состоянии, поскольку при  $\& = 0$  (согласно п. б) элемент не находится под влиянием отказа, а при  $\& = 1$  (согласно п. е) элемент находится под влиянием отказа;

и) если установлена комбинация 1 и &, то результат аналогичен п. з).

В табл. 4 желтым цветом выделены ячейки, порождающие неоднозначность, в результате чего требуется в дальнейшем осуществлять параллельный анализ каждого из возможных вариантов. Так, в соответствии с формулами в ячейке 1-2 (анализ rORi, т. е. оператора ORi в обратном направлении)

состояние  $x_{id} = 1$  может быть следствием неопределенности & сигнала на любом из входов, даже если другой вход может быть не подвержен влиянию отказа. Жирными рамками выделены ячейки с различными комбинациями выходных сигналов, соответствующими одному и тому же состоянию элемента. Например, согласно ячейке 3-2 элемент с оператором ORo подвержен влиянию отказа, если любой из его выходов находится под влиянием отказа.

Распространение формул табл. 3 и 4 на случаи трех и более входов и выходов очевидно.

**5. ФОРМУЛЬНЫЕ ЗАПИСИ ТРИПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЕЙ**

Прямой анализ ЛС соответствует моделированию потактового распространения влияния отказов от одних элементов к другим и записывается соотношениями для динамики состояний и формирования выхода

$$X_{k+1} = DM \overset{\rightarrow}{\diamond} X_k + X_{\text{но}}, Y_k = EM \times X_k, \quad (1)$$

$$k = 1, 2, \dots,$$

где  $X_k$  – вектор размерности  $n$  отказов компонентов КБО на  $k$ -м такте вычислений со значениями 1, 0 или &, соотнесенными каждому элементу ЛС;  $X_{\text{но}}$  – начальное состояние вектора  $X_k$ ; DM (Dependency Matrix) – матрица прямой зависимости, заполняемая единицами и пустыми элементами<sup>9</sup>  $\odot$  в соответствии с результатами АФО; EM (Exit Matrix) – матрица выходов, выделяющая те элементы модели КБО, проявление отказов которых наблю-

<sup>9</sup> Не нулевое значение (отсутствие отказа), а признак исключения из учета.





дается непосредственно, заполняется нулями и единицами;  $Y_k$  – вектор выхода размерности  $m$ , компонентами которого являются непосредственно наблюдаемые отказы или их отсутствие. Здесь знаки  $\times$  и  $+$  соответствуют расширенным конъюнкции и дизъюнкции по табл. 3, а знак  $\bar{\diamond}$  – их одновременному использованию по специальной методике, приводимой в § 6. Первая из формул (1) не является алгебраической в традиционном смысле.

Для пояснения выражения (1) рассмотрим демонстрационный пример с пятью элементами, состояние одного из которых наблюдается непосредственно. Граф соответствующей ЛС показан на рис. 3.

Графу демонстрационного примера соответствует следующая запись соотношений (1):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}}_{X_{k+1}} = \underbrace{\begin{matrix} \nabla \\ \text{ANDi} \\ \text{ORi} \\ \nabla \\ \nabla \end{matrix}}_{\text{DM}} \underbrace{\begin{bmatrix} \odot & \odot & \odot & 1 & \odot \\ 1 & \odot & \odot & 1 & \odot \\ 1 & 1 & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & 1 & \odot & \odot \\ 1 & \odot & \odot & \odot & \odot \end{bmatrix}}_{\text{DM}} \bar{\diamond} \quad (2)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}}_{X_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}}_{X_{\text{но}}}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y \end{bmatrix}}_{Y_k} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{EM}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}}_{X_k}$$

где в DM левее строк указаны соответствующие входные операторы, а под столбцами – соответствующие выходные операторы;  $x_i$  – состояния элементов ЛС со значениями 1, 0 или &.

Циклическое использование формул (1) (в демонстрационном примере это формулы (2)) позволяет моделировать по тактам  $k = 0, 1, 2, \dots$  распро-

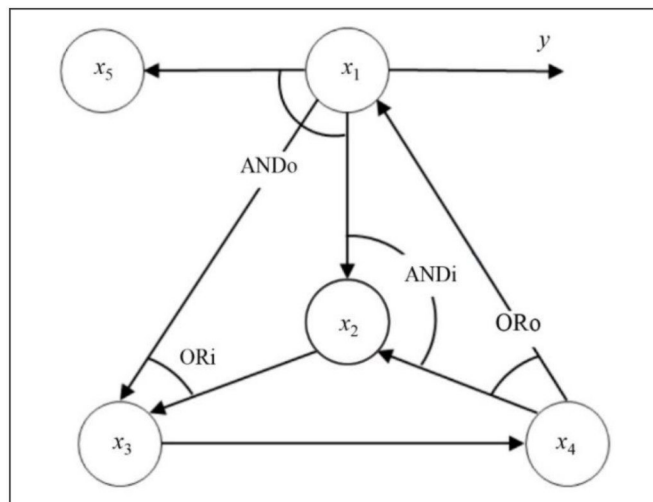


Рис. 3. Демонстрационный пример ЛС

странение влияния начального отказа  $X_{\text{но}}$  на все элементы ЛС.

Обратный анализ, соответствующий поиску первопричины отказов по их проявлениям, в общем виде записывается итерационными формулами для начальной и последующих оценок

$$\hat{X}_0 = \text{EM}^T \times Y_k + \overline{\text{EM}}^R \times \mu(\&),$$

$$\hat{X}_{\tau+1} = \text{rDM} \bar{\diamond} \hat{X}_\tau + \text{EM}^T \times Y_k, \quad \tau = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где  $\hat{X}_\tau$  – оценка вектора отказов компонентов на  $\tau$ -м такте с начальной оценкой  $\hat{X}_0$ ;  $\overline{\text{EM}}^R$  – матричный правый делитель нуля максимального ранга для матрицы EM [28];  $\mu(\&)$  – матрица подходящих размеров с произвольными элементами, обозначаемыми &. Здесь транспонирование бинарной матрицы EM с линейно независимыми строками заменяет более сложную универсальную матричную конструкцию канонизатора [28], а знак  $\bar{\diamond}$  соответствует операциям «обратного» анализа распространения влияния отказов с использованием формул табл. 4, выполняемого по специальной методике, приведенной в § 6.

Матрица обратной зависимости влияния отказов rDM (reversed Dependency Matrix) получается из матрицы DM транспонированием, заменой операторов  $\text{ORi} (x_{\text{in}}^1 + x_{\text{in}}^2 \rightarrow x_{\text{id}})$ ,  $\text{ANDi} (x_{\text{in}}^1 \times x_{\text{in}}^2 \rightarrow x_{\text{id}})$  и  $\text{ORo} (x_{\text{id}} \rightarrow x_{\text{out}}^1 + x_{\text{out}}^2)$ ,  $\text{ANDo} (x_{\text{id}} \rightarrow x_{\text{out}}^1 \times x_{\text{out}}^2)$  операторами  $\text{rORi} (x_{\text{in}}^1 + x_{\text{in}}^2 \leftarrow x_{\text{id}})$ ,  $\text{rANDi} (x_{\text{in}}^1 \times x_{\text{in}}^2 \leftarrow x_{\text{id}})$  и  $\text{rORo}$

$(x_{id} \leftarrow x_{out}^1 + x_{out}^2)$ ,  $rANDo$  ( $x_{id} \leftarrow x_{out}^1 \times x_{out}^2$ ) соответственно и добавлением 1 в диагональную позицию каждой строки, соответствующей нулевой строке<sup>10</sup> объединенной матрицы  $\begin{bmatrix} DM^T & EM^T \end{bmatrix}$ .

Таким образом, модели прямой логики (2) соответствует записанная в форме (3) модель обратной логики

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \\ \hat{x}_5 \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times y_k + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{EM^R} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \& \\ \& \\ \& \\ \& \end{bmatrix}}_{\mu(\&)}, \quad (4)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \\ \hat{x}_5 \end{bmatrix}}_{\hat{x}_{\tau+1}} = \dots \quad (5)$$

$$\begin{matrix} rANDo \\ \nabla \\ \nabla \\ rORo \\ \nabla \end{matrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \odot & 1 & 1 & \odot & 1 \\ \odot & \odot & 1 & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & 1 & \odot \\ 1 & 1 & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & \mathbf{1} \end{bmatrix}}_{rDM} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \\ \hat{x}_5 \end{bmatrix}}_{\hat{x}_\tau} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{EM^T} \times y_k,$$

где полужирным шрифтом выделена диагональная 1, добавленная по правилу формирования  $rDM$ .

Специфичность<sup>11</sup> работы с матрицами  $DM$  и  $rDM$  изложена в § 6.

## 6. МЕТОДИКА РАБОТЫ С ТРИПЛЕКСНЫМИ МОДЕЛЯМИ

В модели прямой логики (1) распространения влияния отказов операция  $\hat{\diamond}$  отдаленно напоминает операцию умножения квадратной матрицы на матрицу-столбец справа, но не идентична ей в силу привязанности различных строк и столбцов  $DM$

<sup>10</sup> Нулевой считается строка, содержащая только пустые и нулевые элементы.

<sup>11</sup> В этом заключается новизна представленной методики.

к различным операторам входной и выходной логики ЛС, а также наличия пустых элементов, как это показано в модели (2) демонстрационного примера.

Обозначим бинарный элемент  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца матрицы  $DM$  как  $DM_{i,j}$ . Выполнение операции  $\hat{\diamond}$  прямой логической модели подразумевает последовательную композицию<sup>12</sup> элементов  $x_{j,k}$  матрицы-столбца  $X_k$  с элементами  $DM_{i,j}$  каждой  $i$ -й строки матрицы  $DM$ . При этом элементу  $DM_{i,j}$  со значением 1 соответствует использование триплексного значения переменной  $x_{j,k}$ , а элементу со значением  $\odot$  – его игнорирование. Соотнесенный со строкой матрицы  $DM$  оператор предписывает тип формул из табл. 3, объединяющих элементы строки, а соотнесенный со столбцом матрицы  $DM$  – предварительные действия с триплексной переменной: операторы  $\nabla$  и  $ANDo$  не предписывают каких-либо действий, а оператор  $ORo$  предписывает введение различия используемых в данном столбце переменных  $x_{j,k}$  по условиям предусмотренного переключения в ЛС. Выполненные таким образом композиции каждой строки объединяются в соответствии с операторами, указанными для строк  $DM$ .

Так, первой формуле (2) эквивалентна запись

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{matrix} \nabla \\ ANDi \\ ORi \\ \nabla \\ \nabla \end{matrix} \begin{bmatrix} \odot & \odot & \odot & x_4(ORo) & \odot \\ x_1 & \odot & \odot & x_4(ORo) & \odot \\ x_1 & x_2 & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & x_3 & \odot & \odot \\ x_1 & \odot & \odot & \odot & \odot \end{bmatrix}_k + \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{matrix}_{HO} = \begin{bmatrix} x_{4,k}(ORo) + x_{1,HO} \\ x_{1,k} \times x_{4,k}(ORo) + x_{2,HO} \\ x_{1,k} + x_{2,k} + x_{3,HO} \\ x_{3,k} + x_{4,HO} \\ x_{1,k} + x_{5,HO} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

<sup>12</sup> Здесь этот термин используется как универсальный для расширенных конъюнкции и дизъюнкции.



Здесь запись  $x_{4,k}(\text{ORo})$  относится к такту  $k$  и читается следующим образом: по предусмотренному правилу переключения на выходе элемента 4 (рис. 3) текущее значение  $x_{4,k}$  учитывается только либо в первой ( $x_{1,k+1}$ ), либо во второй ( $x_{2,k+1}$ ) строке (6). Альтернативой значению  $x_{4,k}$  является 0.

Если принять  $x_{1,k} = \&$ ,  $x_{2,\text{но}} = 1$ ,  $x_{4,k} = 1$ , то строка для  $x_{2,k+1}$  дает

$$\text{при } x_4 \xrightarrow{\text{ORo}} x_1: x_{2,k+1} = \underbrace{(\& \times \mathbf{0})}_{0 \text{ (3/2-6)}} + 1 = 1, \quad \underbrace{1}_{1 \text{ (3/1-4)}}$$

$$\text{при } x_4 \xrightarrow{\text{ORo}} x_2: x_{2,k+1} = \underbrace{(\& \times \mathbf{1})}_{\& \text{ (3/2-7)}} + 1 = 1. \quad \underbrace{1}_{1 \text{ (3/1-7)}}$$

Здесь и далее в подстрочных пояснениях в скобках указаны: № табл./строка – столбец ячейки.

В модели обратной логики (3) анализа причин проявления отказов операция  $\hat{\diamond}$  интерпретируется следующим образом. Выполняется последовательная композиция элементов  $\hat{x}_{j,\tau}$  матрицы-столбца  $\hat{X}_\tau$  с элементами  $\text{rDM}_{i,j}$  каждой  $i$ -й строки матрицы  $\text{rDM}$ : элементу  $\text{rDM}_{i,j}$  со значением 1 соответствует использование триплексного значения переменной  $\hat{x}_{j,\tau}$ , а элементу со значением  $\odot$  – его игнорирование, но по иным правилам. Соотнесенный со столбцом матрицы  $\text{rDM}$  оператор предписывает тип формул из табл. 4, а соотнесенный со строкой матрицы  $\text{rDM}$  – формулу объединения

элементов строки и предварительные действия с триплексной переменной: операторы  $\nabla$  и  $\text{rANDo}$  не предписывают каких-либо действий, а оператор  $\text{rORo}$  предписывает введение различия используемых в данном столбце переменных  $x_{j,\tau}$  по условиям предусмотренного переключения в ЛС.

Действия с  $\text{rDM}$  поясняет следующая обобщенная запись, справедливая для любого элемента  $\text{rDM}_{ij}$ :

$$\begin{aligned} [\hat{x}_i]_{\tau+1} &= \text{rOPo} \left[ \dots \underset{\text{rOPi}}{1_{ij}} \dots \right] \hat{\diamond} [\hat{x}_j]_\tau + \dots = \\ &= \left[ \dots \text{rOPo} \quad (? \text{rOPi} ? \leftarrow \hat{x}_{j,\tau})_{\text{табл. 4}} \quad \text{rOPo} \dots \right] + \dots, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\text{rOPi}$  вне квадратных скобок – обобщенное обозначение операторов  $\text{rORi}$ ,  $\text{rANDi}$ ,  $\nabla$  на входе элемента, а  $\text{rOPo}$  вне квадратных скобок – обобщенное обозначение операторов  $\text{rORo}$ ,  $\text{rANDo}$ ,  $\nabla$  на выходе элемента. Внутри квадратных скобок эти обозначения представляют соответствующие операции  $+$  (в случае OR),  $\times$  (в случае AND) или отсутствие таковых (в случае  $\nabla$ ). Вопросительными знаками отмечены значения 1, 0 или  $\&$ , считываемые из табл. 4 для конкретных  $\text{rOPi}$  и  $\hat{x}_{j,\tau}$ .

Так, формуле (5) эквивалентна запись (8). Здесь записи  $x_{1,\tau}(\text{rORo})$  и  $x_{2,\tau}(\text{rORo})$  читаются следующим образом: по предусмотренному правилу переключения на выходе элемента 4 (рис. 3) в строке для  $\hat{x}_{4,\tau+1}$  используется либо значение ( $\hat{x}_{1,\tau}$ ), либо значение ( $\hat{x}_{2,\tau}$ ). Альтернативой является значение 0.

Неоднозначности в формуле (8) либо устраняются согласованием логических формул, либо требуют дополнительного исследования возникающих вариантов.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \\ \hat{x}_5 \end{bmatrix}_{\tau+1} = \begin{bmatrix} \odot & \times & ? \times ? \leftarrow \hat{x}_{2,\tau} \\ \odot & & \odot \\ \odot & & \odot \\ \hat{x}_{1,\tau}(\text{rORo}) + ? \times ? \leftarrow \hat{x}_{2,\tau}(\text{rORo}) + & \odot & + \odot & + \odot \\ \odot & & \odot & \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} ? + ? \leftarrow \hat{x}_{3,\tau} \\ ? + ? \leftarrow \hat{x}_{3,\tau} \\ \odot \\ \hat{x}_{4,\tau} \\ \odot \\ \odot \\ \hat{x}_{5,\tau} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times y_k. \quad (8)$$

Если принять  $\hat{x}_{2,\tau} = 1$ ,  $\hat{x}_{3,\tau} = 0$  и  $y_k = 1$ , то строка для  $\hat{x}_{1,\tau+1}$  дает

$$\hat{x}_{1,\tau+1} = \underbrace{\underbrace{1 \times 1 \leftarrow 1}_{1(4/2-1)} \times \underbrace{0 + 0 \leftarrow 0}_{0(4/1-1)}}_{0(4/4-2)} + 1 = 1,$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{1(4/3-2)}$$

что согласуется с непосредственным анализом графа на рис. 3.

## 7. ОБЩАЯ ЛОГИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРИПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЕЙ

Проблема диагностирования отказов компонентов КБО в процессе их функционирования решается следующим образом. Предлагаемый подход исходит из того, что любая техническая система, рассматриваемая в качестве объекта диагно-

стирования, включает укрупненно три группы частей.

В первую группу включаются различные составные части КБО (аппаратные и программные), отказы которых относятся к значимым (критическим) и охвачены проведенным АФО.

Каналы связи могут быть как физическими (проводная или беспроводная связь между компонентами), так и виртуальными (маршрутизируемая цифровая связь).

В третью группу включены компоненты КБО, посредством которых можно непосредственно идентифицировать (наблюдать) правильность или неправильность функционирования КБО. Как правило, именно на них проявляются конечные эффекты функциональных отказов.

Приводимые в табл. 5 характеристики разнесены по указанным трем группам.

Предлагаемый подход заключается в поочередном многократном использовании прямой и обратной логических моделей. Он обладает следующими характерными особенностями:

Таблица 5

**Возможности и особенности логических моделей**

| Характеристика   | Группа частей системы                                  |   |  |  |
|--|--|---|--|--|
|  | Компоненты системы, в которых могут появиться отказы   | Связи между компонентами, т. е. каналы, по которым распространяется влияние отказов                                     | Места проявления отказов, т. е. те устройства, по поведению которых можно зафиксировать факт появления в системе отказов |  |
| Особенности в отношении возникновения и проявления отказов | Отказы могут быть в любом из анализируемых компонентов | Связи могут любыми в пределах известных структур  | Места проявления отказов точно известны, как и формы этих проявлений   |  |
| Возможности логических моделей                             | Прямая логическая модель                               | Как правило, места предполагаемых отказов (значение вектора $X_k$ ) неизвестны, задаются приблизительно                 | Связи должны быть определены точно   | Места проявления отказов вычисляются, но они могут отличаться от реально наблюдаемых из-за ошибочного задания мест отказов. Это заставляет многократно инициализировать моделирование с варьированием предполагаемых отказов. Критерием точности задания отказов является совпадение вычисленных и измеренных значений векторов выхода $Y_k$ |
|  | Обратная логическая модель                             | Места отказов определяются по результатам вычислений, но нет уверенности в безошибочности из-за неоднозначностей модели | Связи определяются в результате логической инверсии прямой модели  | Места проявления отказов задаются в соответствии с результатами наблюдения   |

- исключительная простота логической модели распространения влияния отказов в виде ЛС позволяет получить простые в вычислительном отношении алгоритмы даже для весьма сложных архитектур КБО;

- построение моделей опирается на отработанную в авиационной отрасли технологию АФО с приемлемыми глубиной и шириной охвата условий функционирования КБО;

- использование триплексных переменных для описания работоспособности компонентов позволяет сокращать число анализируемых вариантов по мере работы алгоритмов;

- чередование моделей позволяет продвигаться путем выполнения следующих шагов.

*Шаг 0.* По известному вектору выходов  $Y_0$  (непосредственно наблюдаемых отказов) по формуле (3) определяется исходная оценка вектора отказов  $\hat{X}_{\tau=0}$ . Оценка  $\hat{X}_{\tau=0}$  содержит компоненты вектора  $Y_0$  в виде 0 и 1, а остальные компоненты – неопределенные.

*Шаг 1.* Путем использования обратной логической модели от мест проявления отказов  $\hat{X}_{\tau=0}$  к предполагаемым отказам осуществляется разделение компонентов  $\hat{X}_{\tau=1, 2, \dots}$  на определенно работоспособные (0), определенно неработоспособные (1) и неопределенные (&). Неопределенные состояния или проходят по ветвям обратной логической модели без изменений, или переходят в определенные состояния. Выполняется число тактов  $\tau$ , достаточное для достижения «стационарной точки», т. е. неизменности получаемого вектора оценок  $\hat{X}_{\tau}$ .

*Шаг 2.* Путем использования прямой логической модели от предполагаемых отказов  $\hat{X}_{k=0} = \hat{X}_{\tau}$  к соответствующим оценкам их проявления  $\hat{Y}_{k=1, 2, \dots} = \text{EM} \times \hat{X}_{k=1, 2, \dots}$  осуществляется либо подтверждение адекватности полученных оценок, либо уточнение неопределенных состояний. Выполняется число тактов  $k$ , достаточное для достижения «стационарной точки», т. е. неизменности получаемого вектора состояний  $\hat{X}_{k=1, 2, \dots}$ .

Шаги 1 и 2 чередуются до тех пор, пока не перестанет изменяться оценка  $\hat{X}_{k=1, 2, \dots}$ .

Ввиду отсутствия аналитического решения задачи вычисления оценки  $\hat{X}_{k=1, 2, \dots}$  по вектору  $Y_0$

остается только вариант ее решения численными итерационными методами. При этом возможно применение большого количества вычислительных алгоритмов, в той или иной степени рациональных и эффективных. Один из возможных алгоритмов раскрыт в работе [19].

## 8. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПРИМЕР

В работе [29] приведен прикладной пример использования алгоритма [19] для обнаружения мест отказов высотно-скоростных параметров вертолета. В работе [30] рассматривается решение задачи поиска отказов в резервированном электрогидравлическом приводе. Ввиду объемности прикладных задач и ограниченного объема статьи рассмотрим упрощенный пример использования описанных выше результатов.

Пусть исследуемый частично резервированный фрагмент КБО имеет вид, приведенный на рис. 4. Здесь привод 1 управляется вычислителями 1 и 2 (для отказа привода требуется отказ обоих вычислителей), приводы 2 и 3 управляются вычислителем 2, блок питания (БП) 1 обеспечивает электропитанием вычислители 1 и 2, БП 2 обеспечивает электропитанием приводы 1 и 2, БП 3 обеспечивает электропитанием привод 3. Для компактности задачи шины электропитания, цифровые и аналоговые линии связи не рассматриваются. Непосредственно наблюдаемыми являются отказы приводов, которые оцениваются по нахождению в заданном допуске текущих положений штоков по отношению к заданным положениям.

Введем обозначения состояний:  $x_1$  – привода 1,  $x_2$  – привода 2,  $x_3$  – привода 3,  $x_4$  – вычислителя 1,  $x_5$  – вычислителя 2,  $x_6$  – БП 1,  $x_7$  – БП 2,  $x_8$  – БП 3. Компонентами вектора выхода являются  $y_1 = x_1$ ,  $y_2 = x_2$  и  $y_3 = x_3$ . Для разведения различных операторов  $\text{OR}_i$  и  $\text{AND}_i$ , формализующих влияние отказов на входе привода 1 ( $(x_4 \times x_5) + x_7$ ), этот привод условно разделен на два элемента  $x_1$  и  $x_9$ .

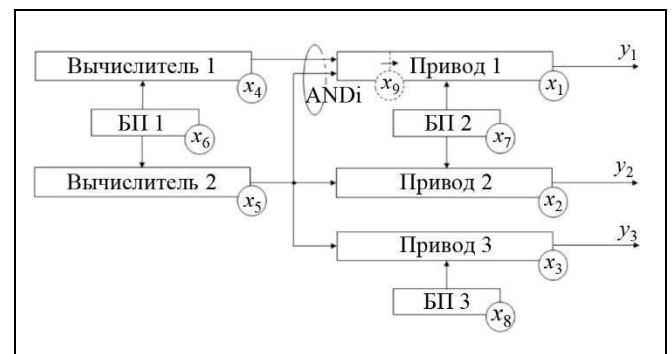


Рис. 4. Функциональная схема фрагмента КБО

Схеме на рис. 4 соответствует прямая логическая модель, записанная по формулам (2)

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{matrix} \text{ORi} \\ \text{ORi} \\ \text{ORi} \\ \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \text{ANDi} \end{matrix} \begin{bmatrix} \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & 1 & \odot & 1 \\ \odot & \odot & \odot & \odot & 1 & \odot & 1 & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & 1 & \odot & \odot & 1 & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & 1 & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & 1 & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & 1 & 1 & \odot & \odot & \odot & \odot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix}_{\text{HO}} \quad (9)$$

$\underbrace{\begin{matrix} \nabla & \nabla & \nabla & \nabla & \text{ANDo} & \text{ANDo} & \text{ANDo} & \nabla & \nabla \\ & & & & & & & & \text{DM} \end{matrix}}_{\text{DM}}$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}_k = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{EM}} \times [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9]_k^T = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_k \quad (10)$$

Запишем формулы для обратной модели (3):

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \\ \hat{x}_5 \\ \hat{x}_6 \\ \hat{x}_7 \\ \hat{x}_8 \\ \hat{x}_9 \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{\text{EM}^T} \times \underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}}_{y_k} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{\text{EM}^R} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \& \\ \& \\ \& \\ \& \\ \& \\ \& \end{bmatrix}}_{\mu(\&)} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \& \\ \& \\ \& \\ \& \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \\ \hat{x}_5 \\ \hat{x}_6 \\ \hat{x}_7 \\ \hat{x}_8 \\ \hat{x}_9 \end{bmatrix}_{\tau+1} = \begin{matrix} \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \text{rANDo} \\ \text{rANDo} \\ \text{rANDo} \\ \nabla \\ \nabla \end{matrix} \begin{bmatrix} \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & 1 \\ \odot & 1 & 1 & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & 1 \\ \odot & \odot & \odot & 1 & 1 & \odot & \odot & \odot & \odot \\ 1 & 1 & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot \\ \odot & \odot & 1 & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot \\ 1 & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot & \odot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \\ \hat{x}_5 \\ \hat{x}_6 \\ \hat{x}_7 \\ \hat{x}_8 \\ \hat{x}_9 \end{bmatrix}_\tau + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{EM}^T} \times \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\underbrace{\begin{matrix} \text{rORi} & \text{rORi} & \text{rORi} & \nabla & \nabla & \nabla & \nabla & \nabla & \text{rANDi} \\ & & & & & & & & \text{rDM} \end{matrix}}_{\text{rDM}}$



Рассмотрим отказ блока питания БП 3 ( $x_{8,0} = 1$ ), начиная с распространения отказа по прямой модели (9), (10). Соответствующие вычисления читатель может выполнить самостоятельно. На первом шаге получаем  $x_{3,1} = 1$ . На всех последующих шагах  $x_{3,k} = 1$  и  $x_{8,k} = 1$ . При этом вектор выхода принимает значение

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

т. е. отказ проявляется в виде нарушения функционирования привода 3.

Теперь проведем анализ (поиск) места отказа по общей логике использования триплексных моделей.

*Шаг 0.* По формуле (11) определяется исходная оценка вектора отказов  $\hat{X}_0$ :

$$\hat{X}_0 = [0 \ 0 \ 1 \ \& \ \& \ \& \ \& \ \& \ \&]^T. \quad (14)$$

В соответствии с этой оценкой первый и второй элементы ЛС (приводы 1 и 2) заведомо не подвержены влиянию отказов, а третий элемент (привод 3) находится под влиянием отказа (место отказа остается неясным), что не противоречит условию задачи. Элементы с четвертого по девятый (остальные элементы ЛС) находятся в неопределенном состоянии.

*Шаг 1.* Подставляем значение вектора (14) в формулу (12). При  $\tau = 0$  с учетом примечания к табл. 4 получаем результат первого такта:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \\ \hat{x}_5 \\ \hat{x}_6 \\ \hat{x}_7 \\ \hat{x}_8 \\ \hat{x}_9 \end{bmatrix}_1 = \begin{matrix} \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \text{rANDo} \\ \text{rANDo} \\ \text{rANDo} \\ \nabla \\ \nabla \end{matrix} \begin{bmatrix} \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & 1 \\ \circ & 1 & 1 & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & 1 \\ \circ & \circ & \circ & 1 & 1 & \circ & \circ & \circ & \circ \\ 1 & 1 & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & 1 & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ 1 & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \end{bmatrix} \begin{matrix} \circ \\ 0 \\ 1 \\ \& \\ \& \\ \& \\ \& \\ \& \\ \& \end{matrix} + \begin{matrix} \circ \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} =$$

rORi rORi rORi  $\nabla$   $\nabla$   $\nabla$   $\nabla$   $\nabla$   $\nabla$  rANDi

rDM

$$\begin{matrix} \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \text{rANDo} \\ \text{rANDo} \\ \text{rANDo} \\ \nabla \\ \nabla \end{matrix} \begin{bmatrix} \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & 0+0 \leftarrow 0 & \frac{1+\&\leftarrow 1}{\&+1\leftarrow 1} & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \& & \& & \circ & \circ & \circ \\ 0+0 \leftarrow 0 & 0+0 \leftarrow 0 & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \frac{\&+1\leftarrow 1}{1+\&\leftarrow 1} & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ 0+0 \leftarrow 0 & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \end{bmatrix} \begin{matrix} \circ \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} + \begin{matrix} \circ \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix}$$

В скалярной записи и с использованием табл. 4 (№ табл. / строка – столбец ячейки) получаем

$$\hat{x}_1 = 0,$$

$$\hat{x}_2 = 0,$$

$$\hat{x}_3 = 1,$$

$$\hat{x}_4 = \underbrace{\& \times \&_5 \leftarrow \&}_{\& (4/2-3)} = \& ,$$

$$\hat{x}_5 = \underbrace{(0+0_7 \leftarrow 0)}_{0 (4/1-1)} \times \underbrace{\left( \frac{1+\&_8 \leftarrow 1}{\&+1_8 \leftarrow 1} \right)}_{1 \text{ или } \& (4/1-2)} \times \underbrace{(\&_4 \times \& \leftarrow \&)}_{\& (4/1-3)} = 0,$$

0(4/4-2)

$$\hat{x}_6 = \underbrace{\& \times \&}_{\& (4/4-3)} = \& ,$$

$$\hat{x}_7 = \underbrace{(0+0_9 \leftarrow 0)}_{0 \text{ или } \& (4/2-2)} \times \underbrace{(0_5 + 0 \leftarrow 0)}_{\& \text{ или } 0 (4/2-2)} = 0,$$

0 (4/4-2)

$$\hat{x}_8 = \frac{1+\&_9 \leftarrow 1}{\&+1_9 \leftarrow 1} = 1 \text{ или } \& ,$$

(4/1-2)

$$\hat{x}_9 = \underbrace{0_7 + 0 \leftarrow 0}_{0 (4/1-1)},$$

где в строке для  $\hat{x}_j$  через дробную черту приведены возможные варианты по табл. 4, полужирным шрифтом выделены значения, относящиеся к  $\hat{x}_j$ , а нижними индексами  $q$  отмечены значения  $\hat{x}_q$ , фигурирующие в формулах табл. 4 в паре с  $\hat{x}_j$ . Заметим, что в формуле для  $\hat{x}_5$  размножение вариантов в соответствии с ячейкой 4-2 в табл. 4 аннулировано, а в формуле для  $\hat{x}_8$  сохранилось.

Итак, после первого такта оценка состояния системы принимает значение

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \\ \hat{x}_5 \\ \hat{x}_6 \\ \hat{x}_7 \\ \hat{x}_8 \\ \hat{x}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \& \\ 0 \\ \& \\ 0 \\ 1 \text{ или } \& \\ 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{– наблюдение отсутствия отказа,} \\ \text{– наблюдение отсутствия отказа,} \\ \text{– наблюдение проявления отказа,} \\ \text{– неопределенное состояние,} \\ \text{– отсутствие отказа,} \\ \text{– неопределенное состояние,} \\ \text{– отсутствие отказа,} \\ \text{– неопределенное состояние,} \\ \text{– отсутствие отказа.} \end{array}$$

Из-за неоднозначности оценки  $\hat{x}_{8,1}$  возможны различные варианты продолжения оценивания. Можно на следующих тактах проанализировать каждый из вариантов  $\hat{x}_{8,1} = 1$ ,  $\hat{x}_{8,1} = \&$ , что увеличит объем вычислений, или принять  $\hat{x}_{8,1} = \&$ . Преимущество каждого из вариантов неочевидно и в каждом случае требует анализа. Воспользуемся вторым вариантом.

Тогда после второго такта использования обратной триплексной модели получаем

$$\hat{X}_2 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \& \ 0 \ \& \ 0]^T,$$

а после третьего такта оценка принимает окончательный вид

$$\hat{X}_3 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \& \ 0]^T$$

и на последующих тактах не изменяется.

*Шаг 2.* В полученном результате одна компонента  $\hat{x}_8$  имеет неопределенное значение, т. е. может быть равна либо 1 (наличие отказа), либо 0 (отсутствие отказа). Для уточнения воспользуемся прямой логической моделью (9), подставляя поочередно  $\hat{x}_8 = 1$  и  $\hat{x}_8 = 0$ . В первом случае получаем

$$\hat{X}' = \begin{matrix} \text{ORi} \\ \text{ORi} \\ \text{ORi} \\ \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \nabla \\ \text{ANDi} \end{matrix} \begin{bmatrix} \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & 1 & \circ & 1 \\ \circ & \circ & \circ & \circ & 1 & \circ & 1 & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & 1 & \circ & \circ & 1 & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & 1 & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & 1 & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ & 1 & 1 & \circ & \circ & \circ & \circ \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \bar{\diamond} \\ \\ \\ \\ \bar{\diamond} \end{matrix}$$

$$\underbrace{\begin{matrix} \nabla & \nabla & \nabla & \nabla & \text{ANDo} & \text{ANDo} & \text{ANDo} & \nabla & \nabla \end{matrix}}_{\text{DM}}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \bar{\diamond} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \bar{\diamond} \end{matrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \bar{\diamond} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \bar{\diamond} \end{matrix}$$

Читатель может убедиться, что второму случаю соответствует  $\hat{X}'' = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . В обоих случаях имеет место наблюдение отказа (10), (13), что подтверждает возможность отказов привода 3 ( $x_3$ ) и блока питания 3 ( $x_8$ ) в первом случае и привода 3 ( $x_3$ ) во втором.

Ввиду простоты примера читатель может самостоятельно провести поиск причин проявления отказа привода 3 ( $x_3$ ). Здесь возможны два варианта: или отказал привод 3 ( $x_3$ ) при неопределенном состоянии блока питания 3 ( $x_8$ ), или отказал блок питания 3 ( $x_8$ ), что вызвало проявление отказа в приводе 3 ( $x_3$ ).

Таким образом, полученный результат примера не противоречит инженерному анализу ситуации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены три варианта решения задачи мониторинга технического состояния компонентов, ориентированные на применение в реконфигурируемых избыточных КБО. Выбор варианта обусловлен различными факторами, в числе которых уровень теоретической и прикладной проработки, цели и возможности разработчика КБО, критичность диагностируемых систем и пр.





Наиболее доступным является использование ВСК в достигнутом на сегодня или предполагаемом в ближайшем будущем виде. На следующем этапе предлагается дополнительное использование логического парного мониторинга, существенно повышающего достоверность результатов диагностирования в условиях неизбежных ошибок средств диагностирования. И в более отдаленной перспективе видится целесообразным дополнительное применение алгоритмов на основе логических моделей распространения влияния отказов в КБО.

Алгоритмы с логическими (триплексными) моделями обладают характерными особенностями, повышающими привлекательность подхода:

- исключительная простота логических моделей предоставляет возможность их эффективного применения даже для весьма сложных архитектур КБО;

- построение таких моделей опирается на отработанную в авиационной отрасли технологию АФО с варьируемыми глубиной и шириной охвата структур КБО;

- работа с триплексными моделями опирается на специальные конструкции, подобные матричным, и требует разработки соответствующих методик и программных средств.

Дальнейшие исследования будут направлены на поиск аналитического решения определения вектора оценки отказов, что позволит значительно сократить количество итераций по определению работоспособного состояния КБО.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность А.М. Агееву за неоценимый вклад в проработку отдельных аспектов предлагаемого подхода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang, Y., Jiang, J. Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems // Proc. the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. – Washington D.C., 2003. – P. 265–276.
2. Willsky, A.S. A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems // Automatica. – 1976. – No. 12. – P. 601–611.
3. Patton, R.J., Frank, P.M., Clark, R.N. Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems. – London: Springer, 2000.
4. Букирев А.С., Савченко А.Ю., Яцечко М.И., Малышев В.А. Система диагностики технического состояния комплекса бортового оборудования воздушного судна на основе интеллектуальных информационных технологий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8, № 1 (28). – С. 12–24. [Bukirev, A.S., Savchenko, A.Y., Yatsechko, M.I., Malyshev, V.A. Diagnostic System for the Technical Condition of the Aircraft Avionics Complex Based on Intelligent Information Technologies // Modeling, Optimization and Information Technology. – 2020. – Vol. 8, no. 1 (28). – P. 12–24. (In Russian)]
5. Diagnosis and Fault-tolerant Control 1: Data-driven and Model-based Fault Diagnosis Techniques / Coordinated by V. Puig and S. Simani. – London: ISTE Ltd; Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2021.
6. Diagnosis and Fault-tolerant Control 2: From Fault Diagnosis to Fault-tolerant Control / Coordinated by V. Puig and S. Simani. – London: ISTE Ltd; Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2021.
7. Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., et al. Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – No. 115. – P. 213–237.
8. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). – М.: Энергоатомиздат, 1981. [Parhomenko, P.P., Sogomonyan, E.S. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizaciya algoritmov diagnostirovaniya, apparatnye sredstva). – М.: Energoatomizdat, 1981. (In Russian)]
9. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Синтез схемы встроенного контроля для многовыходных комбинированных устройств на основе логического дополнения и сжатия сигналов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 7. – С. 583–599. [Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, V.V., Ephanov, D.V. Synthesis of a Built-in Control Circuit for Multi-Output Combinational Devices Based on Logical Complement and Signal Compression // Journal of Instrument Engineering. – 2020. – Vol. 63, no. 7. – P. 583–599. (In Russian)]
10. Агеев А.М. Принципы хранения и мониторинга информации о конфигурациях в задаче управления избыточностью комплекса бортового оборудования // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23. – № 1. – С. 45–55. [Ageev, A.M. Principles of Storing and Monitoring Configuration Information in the Task of On-Board Equipment Complex Redundancy Managing // Mechatronics, automation, control. – 2022. – Vol. 23, no. 1. – P. 45–55. (In Russian)]
11. Chandler P. R. Self-repairing Flight Control System Reliability and Maintainability Program Executive Overview // Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conf. – Dayton, OH, 1984. – P. 586–590.
12. Nishiyama, T., Suzuki, Sh., Sato, M., Masui, K. Simple Adaptive Control with PID for MIMO Fault Tolerant Flight Control Design // AIAA. – 2016. – Art. no. 0132.
13. Мельник Э.В. Методы и программные средства повышения надежности сетевых информационно-управляющих систем на основе реконфигурации ресурсов вычислительных устройств: дис... д-ра техн. наук. – Таганрог: НИИ МВС и ЮФУ, 2014. [Mel'nik, E.V. Metody i programmye sredstva povysheniya nadezhnosti setevykh informacionno-upravlyayushchih sistem na osnove rekonfiguracii resursov vychislitel'nykh ustrojstv: dis... d-ra tekhn. nauk. – Таганрог: НИИ МВС и ЮФУ, 2014. (In Russian)]
14. Патент RU 2629454 C2. Способ формирования отказоустойчивой комплексной системы управления (КСУ) и отказоустойчивая КСУ: № 2016105578: заявл. 18.02.2016; опубл. 29.08.2017 Бюл. № 25 / Зап. В.Ф., Абдулин Р.Р., Кулабузов В.С. и др. [Patent RU 2629454 C2. Sposob formirovaniya otkazoustoychivoy kompleksnoy sistemy upravleniya (KSU) i otkazoustoychivaya KSU: № 2016105578: zayavl. 18.02.2016: opubl. 29.08.2017 Byul. № 25 / Zap. V.F., Abdulin R.R., Kulabuzov V.S. i dr.]

- rovaniya otkazo-ustoichivoi kompleksnoi sistemy upravleniya (KSU) i ot-kazoustoichivaya KSU: № 2016105578: zayavl. 18.02.2016: opubl. 29.08.2017 Byul. № 25 / Zaets. V.F., Abdulin R.R., Kulabuzov V.S. i dr. (In Russian)]
15. Буков В.Н., Агеев А.М., Евгений А.В., Шурман В.А. Управление избыточностью технических систем. Супервизорный способ управления конфигурациями. – М.: ИНФРА-М, 2023. [Bukov, V.N., Ageev, A.M., Evgenov, A.V., Shurman, V.A. Upravlenie izbytochnost'yu tekhnicheskikh sistem. Supervizornyj sposob upravleniya konfiguratsiyami. – М.: INFRA-M, 2023. (In Russian)]
  16. ГОСТ Р 55255–2012. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Организация работ по диагностике технического состояния авиационной техники. Основные положения (перезид.). – М.: Стандартинформ, 2020. [GOST R 55255–2012. Vozdushnyj transport. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta aviacionnoj tekhniki. Organizatsiya rabot po diagnostike tekhnicheskogo sostoyaniya aviacionnoj tekhniki. Osnovnyye polozheniya (pereizd.). – М.: Standartinform, 2020. (In Russian)]
  17. Болелов Э.А., Матюхин К.Н., Прохоров А.В., Прокофьев И.О. Технические средства контроля при эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта. – М.: ИД Акад. им. Н.Е. Жуковского, 2018. [Bolelov, E.A., Matyuhin, K.N., Prohorov, A.V., Prokof'ev, I.O. Tekhnicheskie sredstva kontrolya pri ekspluatatsii radioelektronnogo oborudovaniya vozdušnogo transporta. – М.: ID Akad. im. N.E. Zhukovskogo, 2018. (In Russian)]
  18. Буков В.Н., Озеров Е.В., Шурман В.А. Парный мониторинг избыточных технических систем // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 1. – С. 93–116. [Bukov, V.N., Ozerov, E.V., Shurman, V.A. Pair Monitoring of Redundant Technical System // Automation and Remote Control. – 2020. – Vol. 81, no. 1. – P. 74–93.]
  19. Буков В.Н., Бронников А.М., Сельвесюк Н.И. Алгоритм локализации отказов бортового комплекса на основе смешанных направленных графов // Проблемы безопасности полетов. – 2010. – № 2. – С. 57–71. [Bukov, V.N., Bronnikov, A.M., Sel'vesyuk, N.I. Algoritm lokalizatsii otkazov bortovogo kompleksa na osnove smeshannykh napravlennykh grafov // Problemy bezopasnosti poletov. – 2010. – No. 2. – P. 57–71. (In Russian)]
  20. Диагностика и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования: Учеб. пособие для вузов гражд. авиации / Под ред. И.М. Синдеева. – М.: Транспорт, 1984. [Diagnostirovanie i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya aviacionnogo oborudovaniya: Ucheb. posobie dlya vuzov grazhd. aviacii / Pod red. I.M. Sindeeva. – М.: Transport, 1984. (In Russian)]
  21. Джанджгава Г.И., Дядищев А.В., Гарифов Р.Ш. О концепции мониторинга технического состояния изделий авионики на основе применения средств и методов физической диагностики // Идеи и новации. – 2018. – Т. 6. – № 3. – С. 64–68. [Dzhandzhgava, G.I., Dyadishchev, A.V., Garifov, R.Sh. O koncepcii monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya izdelij avioniki na osnove primeneniya sredstv i metodov fizicheskoy diagnostiki // Idei i novacii. – 2018. – Vol. 6, – no. 3. – P. 64–68. (In Russian)]
  22. Мозгалеvский А.В., Калявин В.П. Системы диагностирования судового оборудования. Уч. пос. – Л.: Судостроение, 1987. [Mozgalevskij, A.V., Kalyavin, V.P. Sistemy diagnostirovaniya sudovogo oborudovaniya. Uch. pos. – L.: Sudostroenie, 1987. (In Russian)]
  23. Соколов Н.Л. Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 6. – С. 16–20. [Sokolov, N.L. Osnovnyye principy diagnostiki rabotosposobnosti bortovoj apparatury avtomaticheskikh KA i vyrabotki reko-mendacij po ustraneniyu neshtatnykh situacij // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. – 2007. – No. 6. – P. 16–20. (In Russian)]
  24. Барановский А.М., Привалов А.Е. Системы контроля и диагностирования бортового оборудования малого космического аппарата // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 4. – С. 51–56. [Baranovsky, A.M., Privalov, A.E. Onboard Monitoring and Diagnostic System of Small Space Vehicles // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. – 2009. – Vol. 52, no. 4. – P. 51–65. (In Russian)]
  25. Буков В.Н., Озеров Е.В., Шурман В.А. Логический парный мониторинг с учетом серой зоны // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 6. – С. 88–104. [Bukov, V.N., Ozerov, E.V., Shurman, V.A. Logical Pair Monitoring That Accounts for the Grey Zone // Automation and Remote Control. – 2020. – Vol. 81, no. 6. – P. 1037–1050.]
  26. Патент RU 2557441 C2 Циклический способ локализации неконтролируемых множественных отказов технических систем в процессе их функционирования и устройство для его реализации: № 2012149034/08: заявл. 19.11.2012: опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20 / Буков В.Н., Аверьянов И.Н., Бронников А.М. и др. [Patent RU 2557441 C2 Tsiklicheskii sposob lokalizatsii nekontroliruemyykh mnozhestvennykh otkazov tekhnicheskikh sistem v protsesse ikh funktsionirovaniya i ustroystvo dlya ego realizatsii: № 2012149034/08: zayavl. 19.11.2012: opubl. 20.07.2015, Byul. № 20 / Bukov V.N., Averi'yanov I.N., Bronnikov A.M., i dr. (In Russian)]
  27. ГОСТ Р 27.606-2013. Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безопасность. – М.: Стандартинформ, 2014. [GOST R 27.606-2013. Nadezhnost' v tekhnike. Upravlenie nadezhnost'yu. Tekhnicheskoe obsluzhivanie, orientirovannoe na bezopasnost'. – М.: Stanfartinform, 2014. (In Russian)]
  28. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2006. [Bukov, V.N. Vlozhenie sistem. Analiticheskij podhod k analizu i sintezu matrichnykh sistem. – Kaluga: Izd-vo N.F. Bockkarevoj, 2006. (In Russian)]
  29. Буков В.Н., Бронников А.М., Сельвесюк Н.И. Модель пространства отказов для канала высотно-скоростных параметров вертолета // Проблемы безопасности полетов. – 2010. – № 10. – С. 39–51. [Bukov, V.N., Bronnikov, A.M., Sel'vesyuk, N.I. Model' rasprostraneniya otkazov dlya kanala vysotno-skorostnykh parametrov vertoeta // Problemy bezopasnosti poletov. – 2010. – No. 10. – P. 39–51. (In Russia)]
  30. Бронников А.М., Морозов Д.В. Локализация непосредственно не наблюдаемых отказов бортовых систем на основе смешанных направленных графов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 1. – С. 62–66. [Bronnikov, A.M., Morozov, D.V. Troubleshooting of Directly not Observable Refusals of Airborne Systems Based on Mixed



Directed Graph // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie.  
– 2013. – No. 1. – P. 62–66. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии  
В.Г. Лебедевым.

Поступила в редакцию 11.06.2023,  
после доработки 24.09.2023.  
Принята к публикации 28.09.2023.

**Буков Валентин Николаевич** – д-р техн. наук, АО  
«НИИАО», г. Жуковский, ✉ e-mail: v\_bukov@mail.ru,  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5194-8251>

**Бронников Андрей Михайлович** – д-р техн. наук, МГТУ им.  
Н.Э. Баумана, ✉ e-mail: bronnikov\_a\_m@mail.ru,

**Воробьев Александр Владимирович** – д-р техн. наук, АО  
«НИИАО», г. Жуковский, ✉ e-mail: vorobiev@niiio.ru,

**Попов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, ВУНЦ ВВС  
«Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и  
Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, ✉ e-mail: saga30@yandex.ru,

**Шурман Владимир Александрович** – филиал АО «РПКБ»,  
г. Жуковский, ✉ e-mail: vshurman@rpkb.ru.

© 2023 г. Буков В.Н., Бронников А.М., Воробьев А.В., Попов  
А.С., Шурман В.А.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons  
«Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## COMPONENT MONITORING TO MANAGE THE REDUNDANCY OF AN ONBOARD EQUIPMENT COMPLEX

V.N. Bukov<sup>1</sup>, A.M. Bronnikov<sup>2</sup>, A.V. Vorob'ev<sup>1</sup>, A.S. Popov<sup>3</sup>, and V.A. Shurman<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Aviation Equipment, Zhukovsky, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Zhukovsky–Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

<sup>4</sup> Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau, Zhukovsky Branch, Zhukovsky, Russia

✉ v\_bukov@mail.ru, ✉ bronnikov\_a\_m@mail.ru, ✉ vorobiev@niiio.ru, ✉ saga30@yandex.ru, ✉ vshurman@rpkb.ru

**Abstract.** This paper considers the technical condition monitoring problem for the components of an onboard equipment complex to perform its real-time reconfiguration. The idea is to use at least three levels of monitoring systems: the nearest perspective, only traditional built-in control (BiC) means to detect faults; the next level, BiC means together with auxiliary means to increase the reliability of technical diagnosis, including mutual cross-pair monitoring; the distant perspective, logical processing algorithms for system observations as a whole based on the normalized rules of functional hazard assessment (FHA) of aviation equipment. Mathematically, the pair monitoring of component conditions consists in forming the so-called preference matrices; their values and special tables are used to determine the condition of diagnosed objects with high reliability and, moreover, to evaluate possible errors of diagnostic tools. For third-level methods, an action sequence is proposed as follows: the reverse and direct logical models reproducing the dependencies of failure states based on FHA results are alternatively initiated. An updated methodology for handling triplex logical models is proposed. The main advantages of logical models—significant simplicity and universality—ensure their effectiveness in a wide range of dynamic systems of varying complexity. A methodological example illustrates the application of logical triplex models.

**Keywords:** onboard equipment complex, technical monitoring, logical steam monitoring, logical triplex models, analysis of functional failures, redundancy management.

**Acknowledgments.** The authors are grateful to A.M. Ageev for his invaluable contribution to separate aspects of the proposed approach.