

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАТНЫХ ОТКАЗОВ В АППАРАТУРЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А. В. Заяра¹, В. П. Фандеев²

¹ Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹zaw1966@mail.ru, ²fandeevVP@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Робототехнические комплексы оснащаются сложной электроаппаратурой различных принципов действия, которая подвержена неизбежным отказам. Успешный поиск мест отказов, в том числе и кратных, будет определять эффективность системы технического обслуживания и ремонта. *Материалы и методы.* Рассматривается диагностическая модель, описывающая состояние аппаратуры при возникновении в ней кратных отказов. *Результаты и выводы.* Разработка диагностического обеспечения на основе этой модели позволит успешно выполнить основные задачи технического диагностирования.

Ключевые слова: техническое диагностирование, электроаппаратура, робототехнические комплексы, поиск места отказа, диагностическая модель, кратные отказы

Для цитирования: Заяра А. В., Фандеев В. П. Моделирование кратных отказов в аппаратуре мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 142–151. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-13

SIMULATION OF MULTIPLE FAILURES IN THE EQUIPMENT OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES

A.V. Zayara¹, V.P. Fandeev²

¹ Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

¹zaw1966@mail.ru, ²fandeevVP@mail.ru

Abstract. *Background.* Robotic complexes are equipped with complex electrical equipment of various operating principles, which is subject to inevitable failures. Successful search for failure sites, including multiple ones, will determine the effectiveness of the maintenance and repair system. *Materials and methods.* A diagnostic model is considered that describes the state of the equipment when multiple failures occur in it. *Results and conclusions.* The development of diagnostic software based on this model will allow you to successfully complete the main tasks of technical diagnostics.

Keywords: technical diagnostics, electrical equipment, robotic systems, failure location search, diagnostic model, multiple failures

For citation: Zayara A.V., Fandeev V.P. Simulation of multiple failures in the equipment of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):142–151. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-13

Мобильные робототехнические комплексы (РТК) повсеместно внедряются во все области человеческой деятельности. Для реализации требований к автономности и адаптивности аппаратура комплексов постоянно усложняется. Одновременно с этой тенденцией обоснованно возникает проблема совершенствования системы технической эксплуатации комплексов, под которой понимается комплекс мероприятий, направленных на поддержание РТК в готовности к использованию по назначению. Важнейшей ее составляющей является подсистема технического обслуживания и ремонта (ТО и Р)¹.

¹ ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения.

Особое место в определении уровня эффективности мероприятий подсистемы занимает пригодность аппаратуры комплексов к проведению технического диагностирования (ТД). Это – процесс определения технического состояния объекта¹, который проводится с применением штатных контрольно-измерительных приборов, диагностического оборудования и контрольно-проверочной аппаратуры. Основными задачами ТД являются контроль технического состояния и поиск места отказа. Для выполнения требований стандартов при проектировании РТК должно разрабатываться диагностическое обеспечение на основе анализа диагностической модели аппаратуры, которая является исходными данными для выбора диагностических параметров и методов их оценки, составления алгоритмов ТД [1].

Общими требованиями к моделям, описывающим отказы в аппаратуре, являются адекватность, универсальность и удобность. В соответствии с этими требованиями модель должна охватывать как можно большее число частных случаев и быть применимой в различных ситуациях². Для выполнения упомянутых требований предлагается рассмотреть применение диагностической модели в форме ориентированного графа причинно-следственных (информационно-энергетических) связей между типовыми элементами замены (ТЭЗ), позволяющих обеспечить методическую достоверность при поиске кратных отказов.

Требования государственных стандартов при разработке диагностического обеспечения проектируемого изделия обязывают использовать в качестве отправной точки его диагностическую модель, которая строится на основе предполагаемой конструкции, условий использования и эксплуатации объекта. В результате исследования диагностической модели устанавливают диагностические признаки, прямые и косвенные параметры, а также методы их оценки, определяют условия работоспособности, разрабатывают алгоритмы диагностирования. Совокупность этих данных называют диагностическим обеспечением. Как правило, используются аналитические модели: дифференциальные уравнения, логические соотношения, диаграммы прохождения сигналов или передаточные функции, предполагающие применение методов индивидуального контроля [2]. При таком методическом подходе к обеспечению контролепригодности состав диагностических параметров получается избыточным, что влечет за собой дополнительные затраты на средства ТД и увеличивает его продолжительность.

Предлагается диагностическая модель, которая задается представлением совокупности физических свойств объекта и его топологии в виде ориентированного графа с указанием причинно-следственных связей, описывающих взаимоотношения между его элементами и параметрами и предполагающая применение методов совместного контроля [2], что позволит оптимизировать состав диагностических параметров, не снижая методическую достоверность контроля.

Первым этапом построения диагностической модели является ее представление в неявном виде в форме ориентированного графа, который формируется на основе структурно-аналитического метода [2]. Исходными данными служат руководство по эксплуатации: прежде всего, функциональная схема объекта диагностирования (ОД) и перечень параметров, используемых при контроле объекта. Такая модель является универсальной для аналоговых и цифровых объектов при условии применения «допусковых» методов контроля параметров, в том числе методов исчерпывающего тестирования (счет переходов и единиц, сигнатурный анализ), и подходит для решения задач диагностирования.

Неявная диагностическая модель (*implicit diagnostic model*) представляется ориентированным графом

$$D_{idm} = (V, F), \quad (1)$$

где V – множество вершин, каждая из которых соответствует конкретному контролируемому параметру; F – множество дуг, показывающих аналитические или статистические зависимости и качественные соотношения между параметрами.

Размерность модели (1) определяется мощностью множеств видов состояния и параметров. Каждый параметр $v_i \in V$ ($i = 1 \dots n$, $n = |P|$) сопоставлен определенному типовому элементу замены, с глубиной до которого производится поиск места отказа. Дугам в ориентированном графе соответствуют качественные соотношения между параметрами. Орграф также представляется в виде матрицы смежности размером $n \times n$, в которой каждая строка сопоставлена вершине v_i , а столбец – дуге f_j . Пример орграфа (1), поясняющий диагностическую модель объекта в неявном виде, приведен на рис. 1.

¹ ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.

² ГОСТ Р 27.004-2009. Надежность в технике. Модели отказов.

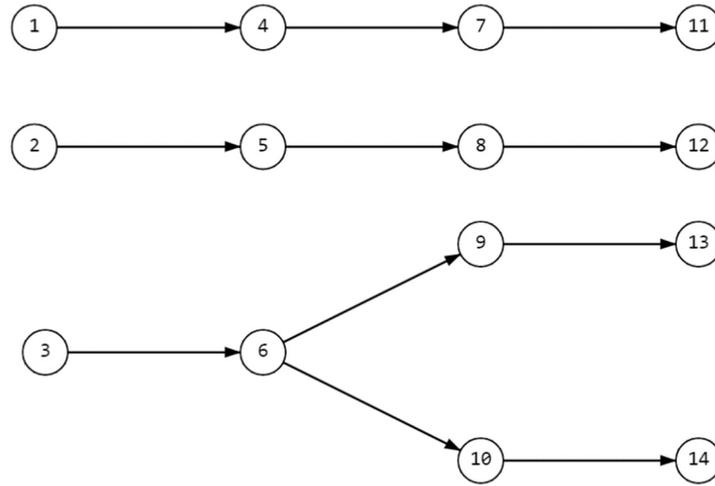


Рис. 1. Пример ориентированного графа диагностической модели в неявном виде

Как правило, граф-модель всего ОД – составной оргграф, состоящий из нескольких связанных подграфов. Для решения первой задачи ТД достаточно оценить (проверить) множество конечных параметров V_k , непосредственно характеризующих его техническое состояние. Так как электроаппаратура РТК относится к многорежимным объектам, то эти параметры проверяются в режимах контроля [6], воспроизводящих штатные режимы работы аппаратуры. Как правило, этим параметрам в оргграфе (1) соответствуют вершины с нулевой полустепенью исхода $d^+(v_i) = 0$. Обычно это – конечные вершины подграфов (*terminal vertex*) (подмножество $V_{iv} \subset V$). Для рассматриваемого примера (рис. 1) $V_{iv} = \{v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}\}$. По значениям контролируемых параметров судят об изменении технического состояния.

Представление ориентированного графа (1) в форме матрицы смежности позволяет выполнить дальнейшие преобразования для получения диагностической модели в явном виде – совокупности формальных описаний неисправных состояний ОД [2].

1. Транзитивное замыкание оргграфа (*transitive closure*) преобразует матрицу смежности оргграфа (1) в матрицу смежности транзитивно замкнутого графа $|D| \rightarrow |D_{ic}^*|$. Замкнутый оргграф D_{ic}^* наглядно демонстрирует влияние каждой предыдущей вершины на последующие по направлению ориентирования графа. Также процедура замыкания позволяет выявить дополнительные контуры обратной связи в ОД.

2. Исправное состояние каждого ТЭЗ будет проявляться допустимыми значениями диагностических параметров, т.е. каждая вершина в замкнутом графе будет иметь петлю. В матрице достижимости всем диагональным элементам необходимо присвоить значение $v_{ii} = 1$.

3. Завершающий этап – инвертирование всех элементов матрицы.

В результате этих преобразований получается матрица, которая содержит информацию о состояниях объекта при возможных недопустимых значениях контролируемых параметров. На основе этой матрицы можно построить оргграф, поясняющий бинарное отношение между множеством видов состояний (отказов) и множеством альтернативных результатов контроля параметров

$$\varphi = E \times U, \tag{2}$$

где E – множество вершин, сопоставленных видам состояния вероятных, однократных отказов (строки матрицы); U – множество вершин, сопоставленных допустимым и недопустимым значениям параметров (столбцы матрицы), которые, в свою очередь,

$$U = U^1 \cup U^0, U^1 \cap U^0 = \emptyset, \tag{3}$$

U^1 – подмножество результатов проверок, показавших допустимые значения диагностических параметров, $U^1 \in U$; U^0 – подмножество результатов проверок, показавших недопустимые значения диагностических параметров, $U^0 \in U$.

Бинарное отношение φ представляет собой диагностическую модель в явном виде (*explicit diagnostic model*), которая может быть визуализирована двудольным оргграфом Φ_{exp} . Матрица отношения φ и двудольный оргграф Φ_{exp} представлены на рис. 2. Необходимо обратить внимание, что в

первоначальном виде полученная матрица не может быть интерпретирована как двудольный ориентированный граф. Существующие средства визуализации позволяют автоматизировать построение двудольного графа, но применительно к этому случаю необходимо последовательно произвести с матрицей φ дополнительные преобразования для получения наглядного рисунка. Тем не менее матрица отношения φ может служить исходными данными для локализации области отказа и оптимизации алгоритмов его поиска, но это – отдельные аспекты решения второй задачи ТД.

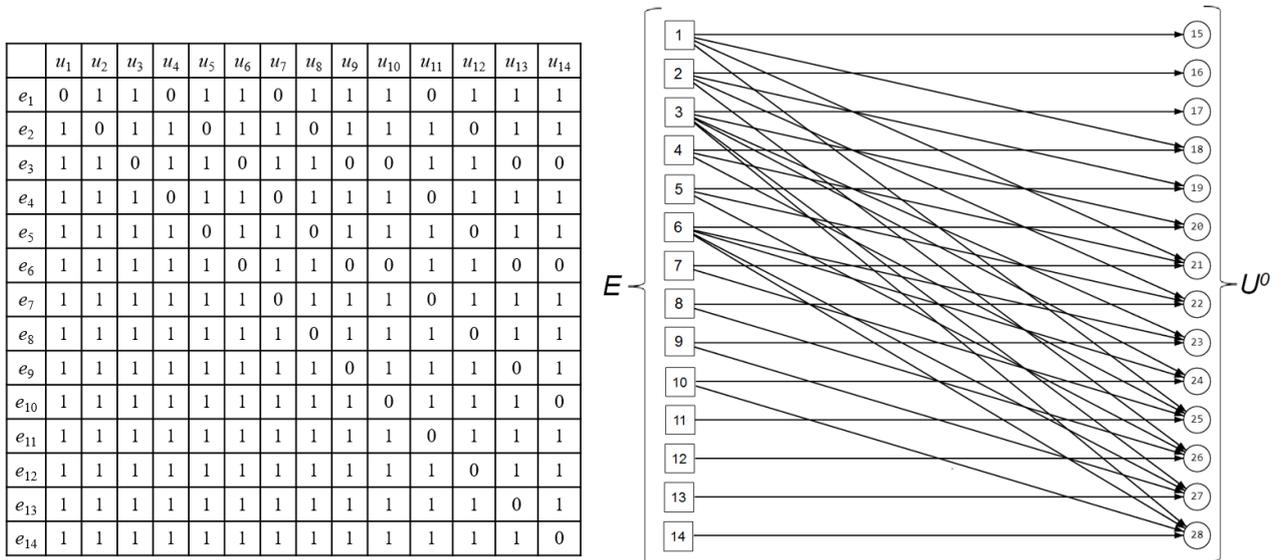


Рис. 2. Матрица и двудольный орграф, поясняющие сущность диагностической модели в явном виде

Бинарное отношение (2) может записываться как

$$\varphi: E \rightarrow U, \tag{4}$$

и показывает, что отказы элементов определяют значения контролируемых параметров.

В матрице отношения (4) каждая i -я строка показывает влияние отказа элемента объекта, непосредственным следствием которого является недопустимое значение i -го параметра (значение «0» на главной диагонали), на исходы (результаты) проверок остальных диагностических параметров в этом объекте. Каждая i -я строка может классифицироваться как кортеж [4] и является описанием неисправного состояния однократного отказа типового элемента замены.

Вершина e_i (отказ элемента объекта, следствием которого является недопустимое значение i -го параметра) соединяется дугами с вершинами, принадлежащими множеству U_j , которое, в свою очередь, представлено объединением двух подмножеств по аналогии с формулой (3), но теперь уже для конкретного состояния однократного отказа e_i

$$U_j^0 \cup U_j^1 = U_j, \text{ где } U_j \subset U, \tag{5}$$

где U_j^0 – подмножество результатов проверок j -х параметров, находящихся вне допустимых пределов, которым соответствуют «0» в i -й строке матрицы $|\varphi|$; U_j^1 – подмножество допустимых исходов проверок j -х параметров и имеющих «1» в i -й строке матрицы $|\varphi|$. Пример матрицы диагностической модели в явном виде для состояния однократного отказа e_1 и подграфа $\varphi(e_1)$ поясняется схемой на рис. 3.

Каждый однократный отказ e_i следствием из формулы (4) имеет свой образ $\varphi(e_i)$, который представлен строкой в матрице графа отношения φ или i -м кортежем длины n , составленным из элементов множества U – различной комбинацией исходов проверок согласно (5)

$$\varphi(e_i) = U_j^{0 \vee 1}, \text{ где } U_j^{0 \vee 1} = \{u_1^{0 \vee 1}, u_2^{0 \vee 1}, \dots, u_n^{0 \vee 1}\}. \tag{6}$$

Элемент $u_j^{0 \vee 1}$ называется j -й компонентой кортежа. Каждый кортеж в матрице однократного отказа имеет разное описание (исходы проверок)

$$\varphi(e_i) \neq \varphi(e_k), i \neq k, i, k = 1 \dots n. \tag{7}$$

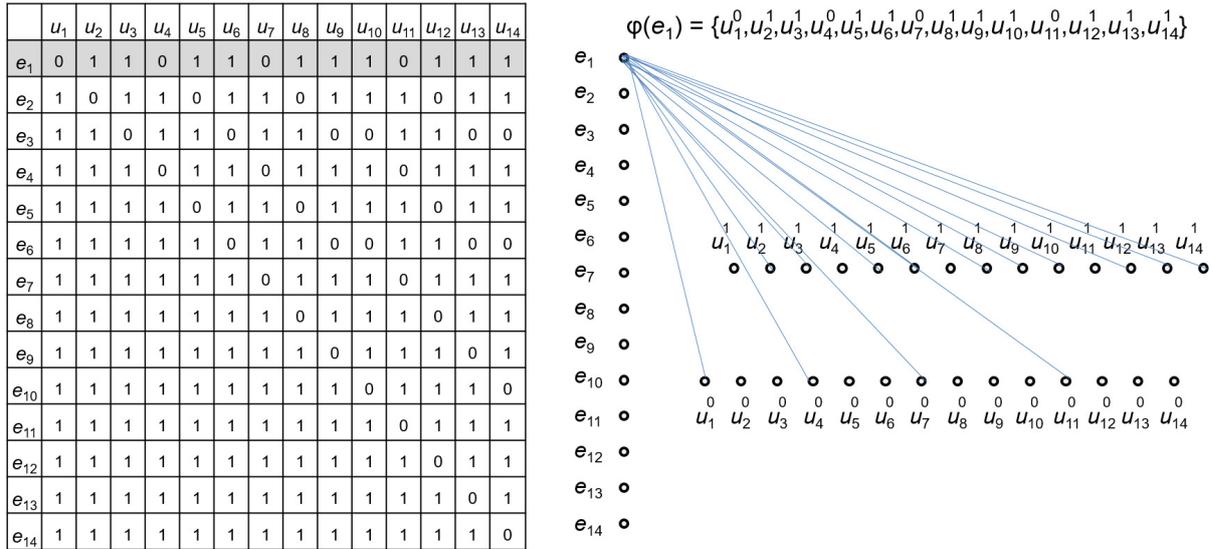


Рис. 3. Схема, поясняющая матрицу и оргграф модели однократного отказа e_1

Другими словами, отказ любого элемента не может проявляться одновременно недопустимым и допустимым значением параметра, т.е. в матрице графа φ нет одинаковых строк [2].

Анализируя матрицу модели в явном виде по столбцам, можно сделать выводы, что граф Φ_{exp} обладает следующими свойствами:

$$\varphi^{-1}(u_j^0) \cup \varphi^{-1}(u_j^1) = E; \tag{8}$$

$$\varphi^{-1}(u_j^0) \cap \varphi^{-1}(u_j^1) = \emptyset, j = 1 \dots n, \tag{9}$$

где $\varphi^{-1}(u_j^0)$ и $\varphi^{-1}(u_j^1)$ – прообразы соответствующих вершин ($u_j^{0 \vee 1}$). Зависимость (8) свидетельствует о том, что исходы проверок в каждом столбце представляют собой вертикальный кортеж и проявляются различными значениями диагностических параметров (n – число параметров). Также условия (8) и (9) свидетельствуют, что диагностических параметров достаточно для распознавания всех состояний однократных отказов [2].

По различным причинам в аппаратуре РТК могут возникнуть одновременно несколько отказов различных типовых элементов замены. Универсальность модели в форме матрицы отношения φ заключается, как раз, в том, что она позволяет получить описание состояния ОД при наличии в нем кратных отказов.

Прежде чем приступить к формированию модели кратного отказа в объекте, следует проанализировать последовательность формирования кортежей (6) на основе причинно-следственных связей оргграфа (1).

Формализованное описание однократного отказа в матрице – строка с исходами проверок $\varphi(e_i)$. Значение «0» на j -м порядковом месте в строке показывает, что в матрице транзитивно замкнутого графа есть дуга из i -й вершины графа (1) в j -ю, которая и определяет недопустимый результат проверки j -го диагностического параметра. И наоборот, значение «1» свидетельствует об отсутствии влияния i -й вершины на исход проверки какого-либо диагностического параметра объекта.

Предлагается к рассмотрению модель двукратного отказа. Количество строк во вновь сформированной матрице увеличится до значения

$$S = \frac{(n+1)!}{2(n-1)!} \vee S = \frac{n(n+1)}{2}, \tag{10}$$

которое рассчитывается как биномиальный коэффициент или сумма членов арифметической прогрессии. Каждая строка в этой матрице будет сопоставлена по состоянию одновременного отказа двух элементов e_i и e_j , представляет собой кортеж, полученный конъюнкцией двух кортежей

$$\varphi(e_i \wedge e_j) = \varphi(e_i) \circ \varphi(e_j), i \neq j. \tag{11}$$

Для определения появления во вновь формируемой матрице неразличимых состояний проводится анализ связности на основе орграфа диагностической модели (1). Исходными данными служит матрица смежности транзитивно замкнутого орграфа

$$D_{tc} = (V, F_{tc}), \tag{12}$$

где F_{tc} – множество дуг транзитивно замкнутого орграфа, которые удовлетворяют условию

$$\exists \forall (f_k f_l) \wedge (f_l f_m) \Rightarrow \exists (f_k f_m), \tag{13}$$

если существует ориентированный путь (дуга) из вершины v_k в v_l и затем из v_l в v_m , то добавляется дуга из v_k в v_m . Тогда при существовании отказа e_k в матрице явной диагностической модели исходом проверки u_k будет «0». Это и есть один из «0», принадлежащих главной диагонали матрицы. Согласно (6) каждый однократный отказ e_i имеет свой образ – кортеж. А значит, в этом кортеже (строке матрице), соответствующем e_i , исходы «0» будут соответствовать тем диагностическим параметрам (вершинам), на которые распространяет свое влияние вершина v_k , т.е. в эти вершины есть транзитивные дуги из нее. Другими словами, возвращаясь к графу D_{tc}^* , который описывает отношение связности (транзитивного влияния), получается, что образ вершины $f_{tc}^*(v_k)$ будет включать в себя вершины, в которые приходят из вершины v_k дуги.

Предлагается рассмотреть в качестве примера независимый подграф модели (1), в частности, его транзитивно замкнутую версию с корневой вершиной $\delta^-(v_3) = 0$ (рис. 4). Образ корневой вершины будет включать в себя все остальные вершины $f_{tc}^*(v_3) = \{v_6, v_9, v_{10}, v_{13}, v_{14}\}$.

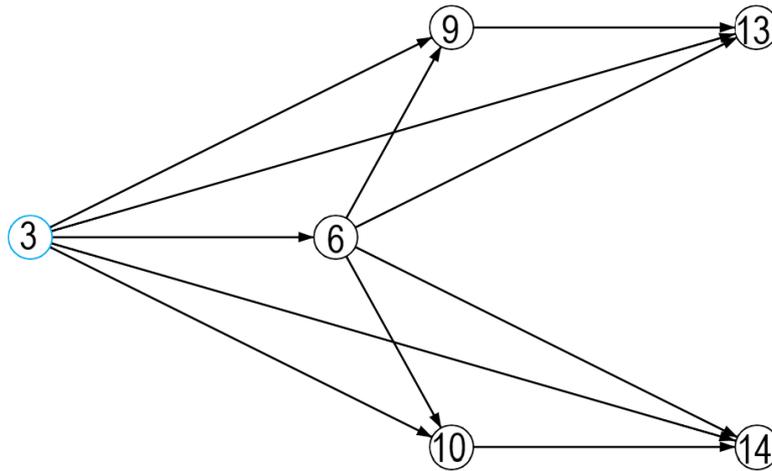


Рис. 4. Связное поддерево транзитивно замкнутого орграфа D_{3tc}

При формировании матрицы двукратного отказа внутри каждой такой области будут формироваться неразличимые кортежи, т.е. условие (7) для множества двукратных отказов уже не будет работать. Предлагается рассмотреть это новое свойство на примере одного отдельного подграфа D_{3tc} (рис. 4) для вершины $\delta^-(f_3) = 0$.

В матрице, соответствующей модели двукратного отказа (табл. 1), появятся одинаковые строки, соответствующие множествам сочетаний однократных отказов диагностических параметров, входящих в рассматриваемый подграф:

$$\varphi(e_3) = \varphi(e_3 \wedge e_6) = \varphi(e_3 \wedge e_9) = \varphi(e_3 \wedge e_{10}) = \varphi(e_3 \wedge e_{13}) = \varphi(e_3 \wedge e_{14}); \tag{14}$$

$$\varphi(e_6) = \varphi(e_6 \wedge e_9) = \varphi(e_6 \wedge e_{10}) = \varphi(e_6 \wedge e_{13}) = \varphi(e_6 \wedge e_{14}); \tag{15}$$

$$\varphi(e_9) = \varphi(e_9 \wedge e_{13}) \text{ и } \varphi(e_{10}) = \varphi(e_{10} \wedge e_{14}). \tag{16}$$

По мере удаления от корневой вершины степень влияния последующих снижается и количество одинаковых кортежей уменьшается, что наглядно демонстрируется транзитивно замкнутым орграфом на рис. 4.

Таблица 1

Матрица двукратных отказов неразличимыми строками

Отказы	Исходы проверок					
	u_3	u_6	u_9	u_{10}	u_{13}	u_{14}
e_3	0	0	0	0	0	0
e_6	1	0	0	0	0	0
e_9	1	1	0	1	0	1
e_{10}	1	1	1	0	1	0
e_{13}	1	1	1	1	0	1
e_{14}	1	1	1	1	1	0
$e_3 \wedge e_6$	0	0	0	0	0	0
$e_3 \wedge e_9$	0	0	0	0	0	0
$e_3 \wedge e_{10}$	0	0	0	0	0	0
$e_3 \wedge e_{13}$	0	0	0	0	0	0
$e_3 \wedge e_{14}$	0	0	0	0	0	0
$e_6 \wedge e_9$	1	0	0	0	0	0
$e_6 \wedge e_{10}$	1	0	0	0	0	0
$e_6 \wedge e_{13}$	1	0	0	0	0	0
$e_6 \wedge e_{14}$	1	0	0	0	0	0
$e_9 \wedge e_{10}$	1	1	0	0	0	0
$e_9 \wedge e_{13}$	1	1	0	1	0	1
$e_9 \wedge e_{14}$	1	1	0	1	0	0
$e_{10} \wedge e_{13}$	1	1	1	0	0	0
$e_{10} \wedge e_{14}$	1	1	1	0	1	0
$e_{13} \wedge e_{14}$	1	1	1	1	0	0

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при наличии в объекте двукратных отказов свойство (7) нельзя применить для различения состояний (поиска отказавшего типового элемента замены). По этой причине в состав матрицы явной диагностической модели двукратных отказов, построенной на основе ориентированного графа причинно-следственных связей, обязательно будут включены одинаковые строки.

В матрице двукратного отказа появляются четыре группы неразличимых строк в соответствии с формулами (14)–(16). В табл. 1 для наглядности они выделены одинаковыми оттенками серого цвета. После того, как из каждой группы неразличимых строк оставить только по одной уникальной строке, матрица двукратного отказа приобретет вид табл. 2.

Несмотря на то, что условия (8) и (9) в рассматриваемом случае не работают, организация поиска места отказа с использованием рассматриваемой модели обеспечивает требуемую достоверность. Место ТД в технологических операциях ТО и Р поясняется схемой на рис. 5¹.

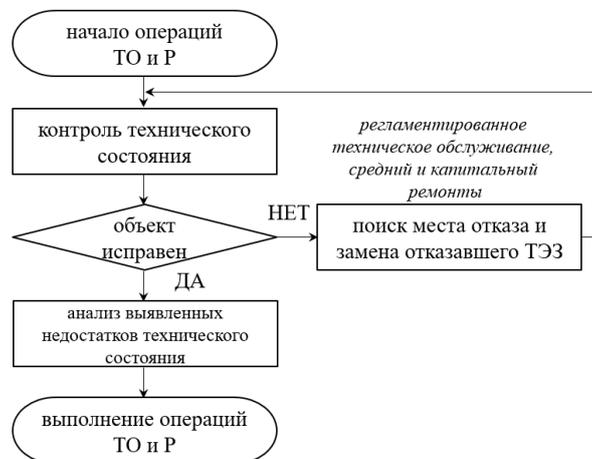


Рис. 5. Обобщенная схема, поясняющая место ТД в технологических операциях ТО и Р комплекса

¹ ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.

В модели матрицы двукратного отказа (табл. 2) остались только неразличимые состояния, соответствующие сочетаниям определенных отказов, которым в транзитивно замкнутом графе D_{tc}^* поставлены пары вершин, не имеющих отношение связности [5, 6]:

$$e_9 \wedge e_{10}; e_9 \wedge e_{14}; e_{10} \wedge e_{13} \text{ и } e_{13} \wedge e_{14}. \tag{17}$$

Все другие неразличимые сочетания состояний будут однозначно содержать в себе отказ элемента, инициирующего отношение связности. Применяя алгоритмы поиска места отказа, разработанные на основе модели однократного отказа, распознается группа сочетаний, которую объединил отказ инициирующего элемента. Также вполне очевидно, что, используя процедуру диагностирования с восстановлением (рис. 5), алгоритмы поиска приведут к нахождению одного отказавшего элемента из пар (17). Для подтверждения теоретических заключений предлагается провести статистическое моделирование, сущность которого поясняется схемой на рис. 6. В модели двукратного отказа (табл. 2) имитируется поиск отказавшего состояния, которое проявляется определенным размещением исходов проверок: нулей и единиц.

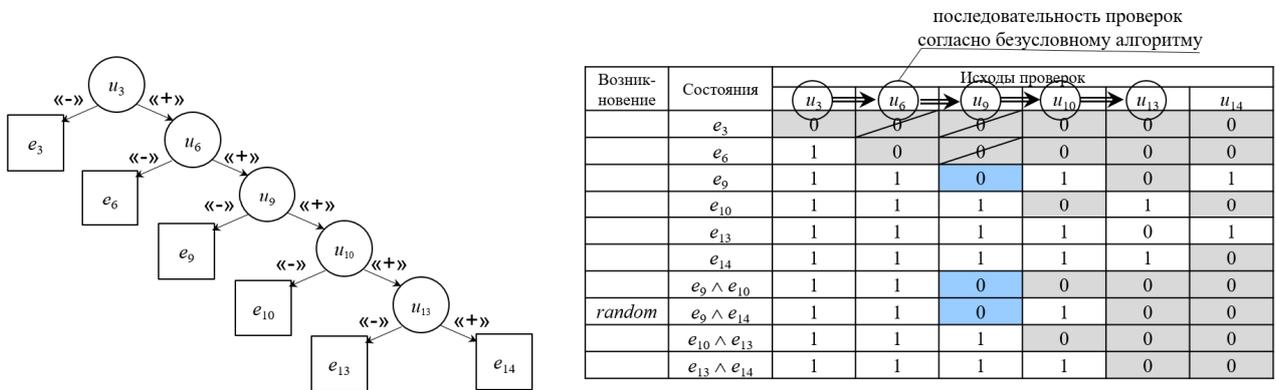


Рис. 6. Схема, поясняющая процедуру поиска места отказа с использованием безусловного алгоритма в области D_{3tc}

Таблица 2

Матрица различных состояний двукратных отказов

Состояния	Исходы проверок					
	u_3	u_6	u_9	u_{10}	u_{13}	u_{14}
e_3	0	0	0	0	0	0
e_6	1	0	0	0	0	0
e_9	1	1	0	1	0	1
e_{10}	1	1	1	0	1	0
e_{13}	1	1	1	1	0	1
e_{14}	1	1	1	1	1	0
$e_9 \wedge e_{10}$	1	1	0	0	0	0
$e_9 \wedge e_{14}$	1	1	0	1	0	0
$e_{10} \wedge e_{13}$	1	1	1	0	0	0
$e_{13} \wedge e_{14}$	1	1	1	1	0	0

На схеме в левой части рисунка представлен граф безусловного алгоритма поиска места отказа. Окружностями на дихотомическом графе обозначены проверки элементов, входящих в состав подграфа D_{3tc} . Из каждой окружности выходят по две дуги. Одна обозначена знаком «-» и соответствует отрицательному исходу проверки, вторая – «+» и свидетельствует, что значение диагностического параметра находится в пределах допуска.

Моделирование проводится следующим образом. В псевдослучайном порядке выбирается одно из состояний отказов, перечисленных в втором столбце матрицы. Затем с помощью определенной алгоритмом последовательности оцениваются исходы проверок в зависимости от моделируемого состояния объекта. В рассматриваемом примере псевдослучайным образом назначено состояние одновременных отказов $e_9 \wedge e_{14}$. В дереве алгоритма первой проверкой назначена проверка u_3 . В этом

состоянии ее исход определяется в допустимых пределах «+». Следовательно, назначается вторая проверка в установленной последовательности u_6 , а состояние e_3 вычеркивается из дальнейшего поиска (не рассматривается). Далее, согласно алгоритму, следует проверка u_9 . В соответствии с матрицей состоянию $e_9 \wedge e_{14}$ сопоставлен недопустимый исход u_9^0 . Такой же недопустимый исход определяют состояния e_9 и $e_9 \wedge e_{10}$ (выделены синим цветом на схеме). Все три состояния: e_9 , $e_9 \wedge e_{10}$ и $e_9 \wedge e_{14}$ проверка u_9 выделяет своим отрицательным исходом. Истинное состояние объекта диагностирования $e_9 \wedge e_{10} \subset \{e_9, e_9 \wedge e_{10}, e_9 \wedge e_{14}\}$ включено в подмножество состояний, которое выделяет u_9^0 . Другими словами, однозначно можно сделать вывод, что поиск с использованием данной модели позволяет различить одно состояние из сочетания отказов. А замена обнаруженного отказавшего ТЭЗ по принципу, поясняемому схемой на рис. 5, гарантирует нахождение второго отказавшего элемента.

Для подтверждения теоретических заключений разработана программа на языке C++, реализующая статистическое моделирование. Проведено 1000 машинных реализаций на основе модели (см. табл. 2) и безусловного алгоритма поиска места отказа (рис. 6). Во всех случаях состояние отказа было определено.

Рассмотренная в статье модель позволяет формализовать разработку диагностического обеспечения к сложной аппаратуре, входящей в состав РТК. Помимо этого, еще на этапе разработки модель создает исходные данные для выполнения требований национального стандарта (ГОСТ 15.016-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению) к номенклатуре диагностических (контролируемых) параметров, средствам методам и правилам ТД [7, 8].

Диагностическая модель кратного отказа служит исходными данными для формирования требований к составу встроенных средств контроля в конструкции изделия и автоматизации процедуры поиска отказавшего ТЭЗ. В результате снижается трудоемкость ручного поиска и, соответственно, улучшается эффективность подсистемы ТО и Р.

Список литературы

1. Бородин С. М. Основы технической диагностики электронных средств : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2019. С. 48.
2. Фандеев В. П., Волков В. С. Методические основы диагностического моделирования электронных приборов и аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. Спецвыпуск № 1. С. 47–53.
3. Еремин Е. Л., Пикуль З. Д., Теличенко Д. А. Алгоритмы систем адаптации для одного класса структурно и параметрически неопределенных объектов с запаздыванием по управлению // Вестник ТОГУ. 2015. № 2.
4. Кривцова И. Е., Лебедев И. С., Настека А. В. Основы дискретной математики. Часть 1 : учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2016. С. 92.
5. Бородин С. М. Основы технической диагностики электронных средств : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2019. С. 48.
6. Алексеев В. Е., Захарова Д. В. Теория графов : учеб. пособие. Нижегородский госуниверситет, 2017. С. 119.
7. Данилин М. Е., Заяра А. В., Федулов В. Д. Предложения по организации виртуальных испытаний алгоритмов распознавания объектов в системах управления мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 100–106.
8. Бецов А. В. О возможной модели утраты работоспособности системы аэромобильных комплексов специального назначения // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 1. С. 3–8.

References

1. Borodin S.M. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki elektronnykh sredstv: ucheb. posobie = Fundamentals of technical diagnostics of electronic means : textbook*. Ul'yanovsk: UlGTU, 2019:48. (In Russ.)
2. Fandeev V.P., Volkov V.S. Methodological foundations of diagnostic modeling of electronic devices and equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*. 2017;(Spec.ed.1):47–53. (In Russ.)
3. Eremin E.L., Pikul' Z.D., Telichenko D.A. Algorithms of adaptation systems for one class of structurally and parametrically indeterminate objects with control delay. *Vestnik TOGU = Bulletin of the TOGU*. 2015;(2). (In Russ.)
4. Krivtsova I.E., Lebedev I.S., Nasteka A.V. *Osnovy diskretnoy matematiki. Chast' 1: ucheb. posobie = Fundamentals of discrete mathematics. Part 1 : textbook*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2016:92. (In Russ.)
5. Borodin S.M. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki elektronnykh sredstv: ucheb. posobie = Fundamentals of technical diagnostics of electronic means : textbook*. Ul'yanovsk: UlGTU, 2019:48. (In Russ.)

6. Alekseev V.E, Zakharova D.V. *Teoriya grafov: ucheb. posobie = Graph theory : textbook*. Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2017:119. (In Russ.)
7. Danilin M.E., Zayara A.V., Fedulov V.D. Proposals for the organization of virtual tests of object recognition algorithms in control systems of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):100–106. (In Russ.)
8. Betskov A.V. On a possible model of loss of operability of a system of special-purpose airmobile complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(1):3–8. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Заяра

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
научно исследовательского отдела,
Военный инновационный технополис «ЭРА»
(Россия, г. Анапа, Пионерский пр-кт, 41)
E-mail: zaw1966@mail.ru

Andrey V. Zayara

Candidate of technical sciences,
senior research fellow of the research department,
Military Innovative Technopolis "ERA"
(41 Pionersky avenue, Anapa, Russia)

Владимир Петрович Фандеев

доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры медицинской кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: fandeevVP@mail.ru

Vladimir P. Fandeev

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of medical cybernetics and computer science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 18.08.2023

Поступила после рецензирования / Revised 25.08.2023

Принята к публикации / Accepted 09.09.2023