

# МОНИТОРИНГ ГОТОВНОСТИ КОНФИГУРАЦИЙ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**В.Н. Буков**

*ОАО «Бортовые аэронавигационные системы»*  
Россия, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, 15  
E-mail: v\_bukov@mail.ru

**А.М. Бронников**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*  
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с. 1,  
E-mail: bronnikov\_a\_m@mail.ru

**А.С. Попов**

*ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»*  
Россия, 394064, Воронеж, Старых Большевиков ул., 64 А  
E-mail: saga30@yandex.ru

**Ключевые слова:** управление избыточностью, супервизор конфигураций, диагностирование, мониторинг, триплексная модель, локализация отказа.

**Аннотация:** В докладе рассматриваются мониторинг работоспособности компонентов реконфигурируемого комплекса бортового оборудования с помощью триплексной логической сети с ориентацией на его использование в рамках подхода к управлению избыточностью на основе супервизорного способа. Основу мониторинга составляет использование моделирования распространения отказов в прямом и обратном направлении.

## 1. Введение

Управление избыточностью комплекса бортового оборудования (КБО) можно разделить на два не всегда самостоятельных направления [1]:

- мониторинг технического состояния компонентов,
- парирование неисправностей (реконфигурирование) системы с целью сохранения или минимизации потери ее функциональности.

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 [2-4] не связаны с последующим использованием их результатов в реальном времени. С другой стороны, авторы подходов к реконфигурированию [1, 5-10] исходят из результатов мониторинга как данности.

В докладе рассматривается мониторинг работоспособности компонентов КБО с помощью триплексной логической сети с ориентацией на использование в рамках подхода к управлению избыточностью на основе супервизорного способа [10].

## 2. Триплексная логическая сеть

Используется прямая и обратная формализованные логические модели распространения отказов в объекте диагностирования с триплексными переменными. Триплексные переменные находятся в следующих состояниях: 0 – отсутствие отказа или его влияния, 1 – наличие отказа или его влияния, & – состояние не определено. Впервые данный подход был предложен в [11]. Для поиска места отказов в [11] разработан итерационный алгоритм на основе использования прямой и обратной логических триплексных моделей. В [12] данный подход получил дальнейшее развитие в направлении повышения общности и математической строгости.

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. 1. 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 переменных на выходах:  $x_{id} \rightarrow x_{out}^1 + x_{out}^2$  для оператора  $OR_o$  или  $x_{id} \rightarrow x_{out}^1 \times x_{out}^2$  для оператора  $AND_o$ .

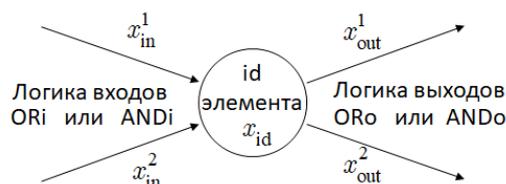


Рис. 1. Элемент логической сети

Каждый переход между элементами предложенной ЛС от причины к следствию (прямая логическая модель) выполняется по правилам, сведенным в таблице 1. Дополнительно введенный символ  $\nabla$ , который будем тоже называть оператором, соответствует отсутствию альтернативы.

Таблица 1. Арифметика прямой логики.

Операторы и номера строк	Номера столбцов и формулы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$OR_i$	1	$1+1 \rightarrow 1$	$1+0 \rightarrow 1$	$1+\& \rightarrow 1$	$0+1 \rightarrow 1$	$0+0 \rightarrow 0$	$0+\& \rightarrow \&$	$\&+1 \rightarrow 1$	$\&+0 \rightarrow \&$	$\&+\& \rightarrow \&$
$AND_i$	2	$1 \times 1 \rightarrow 1$	$1 \times 0 \rightarrow 0$	$1 \times \& \rightarrow \&$	$0 \times 1 \rightarrow 0$	$0 \times 0 \rightarrow 0$	$0 \times \& \rightarrow 0$	$\& \times 1 \rightarrow \&$	$\& \times 0 \rightarrow 0$	$\& \times \& \rightarrow \&$
$OR_o$	3		$1 \rightarrow 1+0$		$1 \rightarrow 0+1$	$0 \rightarrow 0+0$	$\& \rightarrow 0+\&$		$\& \rightarrow \&+0$	
$AND_o$	4		$1 \rightarrow 1 \times 1$		$0 \rightarrow 0 \times 0$				$\& \rightarrow \& \times \&$	
$\nabla$	5		$1 \rightarrow 1$		$0 \rightarrow 0$				$\& \rightarrow \&$	

Ячейки, выделенные в таблице 1 серым фоном, вызывают распространение неопределенности & по триплексной ЛС.

Процесс анализа отказов системы связан с обратной логикой: от проявлений отказов к их причинам. Обратная логика – это когда известен выход и нужно сделать

суждение о входе. 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 таблице 2.

Таблица 2. Арифметика обратной логики.

Операторы и номера строк		Номера столбцов и формулы		
		1	2	3
rORi	1	0+0←0	(1+1←1 или 1+0←1 или 0+1←1) 1+&←1 или &+1←1	0+&←& или &+0←& или &+&←&
rANDi	2	1×1←1	(0×0←0 или 1×0←0 или 0×1←0) 0×&←0 или &×0←0	1×&←& или &×1←& или &×&←&
rORo	3	0←0+0	1←1+1 или 1←1+0 или 1←0+1 или 1←1+& или 1←&+1	&←0+& или &←&+0 или &←&+&
rANDo	4	1←1×1	0←1×0 или 0←0×1 или 0←0×0 или 0←&×0 или 0←0×&	&←1×& или &←&×1 или &←&×&
∇	5	1←1	0←0	&←&

Если понятие «неопределенный» отождествлять с понятием «любой», то формулы в скобках таблицы 2 следует игнорировать.

В таблице 2 серой заливкой выделены ячейки, порождающие неопределенность, в результате чего требуется в дальнейшем осуществлять параллельный анализ каждого из возможных вариантов. Жирными рамками выделены ячейки с различными комбинациями выходных сигналов, соответствующими одному и тому же состоянию элемента.

### 3. Прямая и обратная логические модели

Прямой анализ ЛС соответствует моделированию потактового распространения влияния отказов от одних элементов к другим и может быть описан формульными соотношениями [12]

$$(1) \quad X_{k+1} = DM \overset{\vee}{\circ} X_k + X_{но}, \quad Y_k = EM \times X_k, \quad k = 1, 2, \dots,$$

где  $X_k$  – вектор размерности  $n$  состояний компонентов КБО на  $k$ -м такте вычислений со значениями 1, 0 или &, соотнесенными каждому элементу ЛС,  $X_{но}$  – начальное состояние вектора  $X_k$ , DM (Dependency Matrix) – матрица прямой зависимости, заполняемая единицами и пустыми элементами  $\ominus$ , EM (Exit Matrix) – матрица выходов, выделяющая те элементы модели КБО, проявление отказов которых наблюдается 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 таблице 1, а знак  $\overset{\vee}{\circ}$  – их одновременному использованию по специальной методике. Первая из формул (1) не является алгебраической в традиционном смысле.

Обратный анализ, соответствующий поиску первопричины отказов по их проявлениям, в общем виде записывается итерационными формулами

$$(2) \quad \hat{X}_0 = EM^T \times Y_k + \overline{EM}^R \times \mu(\&), \quad \hat{X}_{\tau+1} = rDM \overset{\vee}{\circ} \hat{X}_\tau + EM^T \times Y_k, \quad \tau = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $\hat{X}_\tau$  – оценка вектора отказов компонентов на  $\tau$ -м такте с начальной оценкой  $\hat{X}_0$ ,  $\overline{EM}^R$  – матричный правый делитель нуля максимального ранга для матрицы EM [1],  $\mu(\&)$  – матрица подходящих размеров с произвольными элементами, обозначаемыми &. Здесь знак  $\overset{\vee}{\circ}$  соответствует операциям «обратного» анализа распространения влияния отказов с использованием формул таблицы 2.

Матрица обратной зависимости влияния отказов rDM (reversed Dependency Matrix) получается из матрицы DM транспонированием, заменой операторов ORi ( $x_{in}^1 + x_{in}^2 \rightarrow x_{id}$ ), ANDi ( $x_{in}^1 \times x_{in}^2 \rightarrow x_{id}$ ) и ORo ( $x_{id} \rightarrow x_{out}^1 + x_{out}^2$ ), ANDo ( $x_{id} \rightarrow x_{out}^1 \times x_{out}^2$ ) операторами rORi ( $x_{in}^1 + x_{in}^2 \leftarrow x_{id}$ ), rANDi ( $x_{in}^1 \times x_{in}^2 \leftarrow x_{id}$ ) и 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>1</sup> объединенной матрицы  $[DM^T \quad EM^T]$ .

Операции с DM и rDM введенных триплексных моделей не являются общепринятыми и кратко поясняются ниже.

Операция  $\vec{\delta}$  прямой логической модели предусматривает построчную композицию элементов DM с компонентами вектора  $X_k$ . При этом в вычислениях используются только компоненты  $x_{j,k}$ , соответствующие единичным элементам DM. Значения  $\odot$  в DM предписывают игнорирование соответствующих элементов  $x_{j,k}$ . Обобщенно сказанное записывается формулой

$$(3) \quad [x_i]_{k+1} = \underbrace{OPi[\dots 1_{ij} \dots]}_{DM} \vec{\delta} [x_j]_k + \dots = [\dots OPi x_{j,k}(OPo) OPi \dots]_{\text{табл.2}} + \dots$$

Здесь OPi вне квадратных скобок – обобщенное обозначение операторов ORi, ANDi,  $\nabla$  на входе элементов ЛС, а OPo вне квадратных скобок – обобщенное обозначение операторов ORo, ANDo,  $\nabla$  на выходе элементов ЛС. Внутри квадратных скобок эти обозначения представляют соответствующие операции + (в случае OR),  $\times$  (в случае AND) или отсутствие таковых (в случае  $\nabla$ ) согласно таблице 1. Запись  $x_{j,k}(OPo)$  обозначает предварительные действия с компонентой  $x_{j,k}$ : операторы  $\nabla$  и ANDo не предписывают каких-либо действий, а оператор ORo – введение различия используемых в данном столбце переменных  $x_{j,k}$  по условиям предусмотренного переключения в ЛС.

Действиям с rDM обратной логической модели, формализуемым операцией  $\vec{\delta}$ , присуща большая сложность. Обобщенная запись имеет вид

$$[\hat{x}_i]_{\tau+1} = \underbrace{rOPi[\dots 1_{ij} \dots]}_{rDM} \vec{\delta} [\hat{x}_j]_{\tau} + \dots = [\dots rOPi (? rOPi ? \leftarrow \hat{x}_{j,\tau}) rOPi \dots]_{\text{табл.3}} + \dots$$

где использовано аналогичное толкование операторов rOPo и rOPi снаружи и внутри квадратных скобок. Вопросительными знаками отмечены значения 1, 0 или &, считываемые из таблице 2 для конкретных rOPi и  $\hat{x}_{j,\tau}$ .

## 4. Заключение

Мониторинг на основе использования триплексных логических моделей основывается на прямой и обратной логических моделей распространения отказов в объекте диагностирования с триплексными переменными (0 – отсутствие отказа или его влияния, 1 – наличие отказа или его влияния, & – состояние не определено).

Использование триплексных логических моделей дает результаты, тождественные инженерному логическому анализу. Преимущества подхода проявляется в простоте программной реализации, что позволяет получать текущие оценки состояния системы в реальном или близком к нему масштабе времени.

<sup>1</sup> Нулевой считается строка, содержащая только пустые и нулевые элементы.

## Список литературы

1. Буков В. Н., Бронников А. М., Гамаюнов И. Ф. Управление избыточностью технических систем. Генерирование альтернативных конфигураций. М.: ИД Академии Н. Е. Жуковского, 2021.
2. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // *Annual Reviews in Control*. 2008. Vol. 32, No. 2. P. 229-252.
3. Willsky A. S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems // *Automatica*. 1976. No. 12. P. 601-611.
4. Patton R. J., Frank P. M., Clark R. N. *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. London: Springer, 2000.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Nishiyama T., Suzuki Sh., Sato M., Masui K. Simple Adaptive Control with PID for MIMO Fault Tolerant Flight Control Design // *AIAA*. 2016. P. 0132.
9. Мельник Э.В. Методы и программные средства повышения надежности сетевых информационно-управляющих систем на основе реконфигурации ресурсов вычислительных устройств: Дис. док. техн. наук. аганрог: НИИ МВС и ЮФУ, 2014.
10. Буков В.Н., Агеев А.М., Евгенов А.В., Шурман В.А. Управление избыточностью технических систем. Супервизорный способ управления конфигурациями. М.: ИНФРА-М, 2023.
11. 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.
12. Буков В.Н., Бронников А.М., Воробьев А.В., Попов А.С., Шурман В.А. Мониторинг компонентов комплекса бортового оборудования в целях управления его избыточностью // *Проблемы управления*. 2023. № 5. С. 91-109.