

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 .

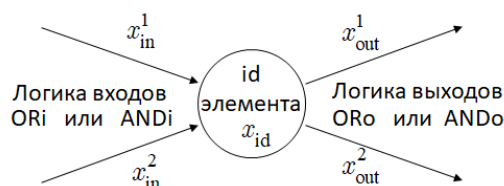


Рис. 1. Элемент логической сети

Каждый переход между элементами предложенной ЛС от причины к следствию (прямая логическая модель) выполняется по правилам, сведенным в таблице 1. Дополнительно введенный символ ∇ , 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		$1 \rightarrow 1 \times 1$		$0 \rightarrow 0 \times 0$				$\& \rightarrow \& \times \&$	
∇	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	$0+0\leftarrow 0$	$(1+1\leftarrow 1 \text{ или } 1+0\leftarrow 1 \text{ или } 0+1\leftarrow 1)$ $1+\&\leftarrow 1 \text{ или } \&+1\leftarrow 1$	$0+\&\leftarrow \& \text{ или } \&+0\leftarrow \& \text{ или } \&+\&\leftarrow \&$
rANDi	2	$1\times 1\leftarrow 1$	$(0\times 0\leftarrow 0 \text{ или } 1\times 0\leftarrow 0 \text{ или } 0\times 1\leftarrow 0)$ $0\times \&\leftarrow 0 \text{ или } \&\times 0\leftarrow 0$	$1\times \&\leftarrow \& \text{ или } \&\times 1\leftarrow \& \text{ или } \&\times \&\leftarrow \&$
rORo	3	$0\leftarrow 0+0$	$1\leftarrow 1+1 \text{ или } 1\leftarrow 1+0 \text{ или } 1\leftarrow 0+1 \text{ или } 1\leftarrow 1+\& \text{ или } 1\leftarrow \&+1$	$\&\leftarrow 0+\& \text{ или } \&\leftarrow \&+0 \text{ или } \&\leftarrow \&+\&$
rANDo	4	$1\leftarrow 1\times 1$	$0\leftarrow 1\times 0 \text{ или } 0\leftarrow 0\times 1 \text{ или } 0\leftarrow 0\times 0 \text{ или } 0\leftarrow \&\times 0 \text{ или } 0\leftarrow 0\times \&$	$\&\leftarrow 1\times \& \text{ или } \&\leftarrow \&\times 1 \text{ или } \&\leftarrow \&\times \&$
∇	5	$1\leftarrow 1$	$0\leftarrow 0$	$\&\leftarrow \&$

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]

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

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 $\vec{\circ}$ – 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

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

где \hat{X}_τ – оценка вектора отказов компонентов на τ -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 $\vec{\circ}$ 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 строке¹ 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, ∇ на входе элементов ЛС, а OPo вне квадратных скобок – обобщенное обозначение операторов ORo, ANDo, ∇ на выходе элементов ЛС. Внутри квадратных скобок эти обозначения представляют соответствующие операции + (в случае OR), \times (в случае AND) или отсутствие таковых (в случае ∇) согласно таблице 1. Запись $x_{j,k}(OPo)$ обозначает предварительные действия с компонентой $x_{j,k}$: операторы ∇ 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.

¹ 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.