10.37882/2223–2966.2021.04–2.18

МЕТОД РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С ЗАВИСИМЫМИ ОТКАЗАМИ

METHOD FOR CALCULATION OF RELIABILITY INDICATORS OF COMPLEX SYSTEMS WITH DEPENDENT FAILURES

K. Chaadaev

Summary. The article discusses an approach based on a universal method for describing a specific technical system and an algorithm for obtaining numerical values of reliability indicators. Practical use of the proposed method greatly simplifies the software implementation of the algorithm for calculating the reliability indicators of complex systems with dependent failures. The developed method makes it possible to expand the class of applied problems of the theory of reliability to be solved.

Keywords: complex system, dependent failures, digital twin, logical-probabilistic approach, operability function, reliability.

Чаадаев Кирилл Витальевич
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
vkchaadaev@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается подход, основанный на универсальном методе описания конкретной технической системы и алгоритме получения численных значений показателей надежности. Практическое использование предлагаемого метода значительно упрощает программную реализацию алгоритма расчета показателей надежности сложных систем с зависимыми отказами. Разработанный метод позволяет расширить класс решаемых прикладных задач теории надежности.

Ключевые слова: зависимые отказы, логико-вероятностный подход, надежность, сложная система, функция работоспособности, цифровой двойник.

Введение

Постиндустриальная модель развития подошла к исчерпанию своих производительных возможностей к началу XXI века, о чем свидетельствуют последние кризисы и снижение темпов экономического роста. В настоящее время мир стоит на пороге новой промышленной революции, находясь в той стадии трансформации, когда инновации из различных сфер деятельности взаимно проникают и изменяют друг друга. Индустрия 4.0 (Industry 4.0) подразумевает переход на полностью автоматизированное цифровое производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме реального времени в постоянном взаимодействии с внешней средой [1]. Разработка, модернизация и внедрение во все сферы деятельности таких сложных технических систем, таких как средства связи и коммуникации, системы мониторинга и управления производственными процессами, промышленные контроллеры, цифровые системы анализа и обработки данных, носят массовый характер, что требует новых подходов к расчету показателей надежности. Требования к функциональности и условиям эксплуатации технической системы определят встречные требования к ее высокой надежности, показатели которой зависят от большого количества элементов, входящих в ее состав. Надежность отдельно взятых элементов системы, в результате научно-технического прогресса, постоянно увеличивается, но сложность технических систем растет гораздо большими темпами.

В работах И.К. Волкова и Е.А. Загоруйко [2], С.Г. Конесева и Р.Т. Хазиевой [3], В.И. Левина [4, 5] рассматриваются вопросы, математического моделирования, связанные с необходимостью построения адекватных моделей расчета показателей надежности многоэлементных, требующих резервирования технических систем. В указанных работах проводится теоретические исследования в различных разделах теории надежности, рассматриваются логико-вероятностные методы, марковские и полумарковские случайные процессы, прогнозирование безотказности электронной элементной базы и др. Также сформированы подходы к решению задач по расчету показателей надежности с использованием средств вычислительной техники.

Изучение и анализ ряда работ [6–10] показал, что основными, представляющими интерес для изучения, являются следующие основные вопросы теории и практики надежности сложных технических систем:

- математическое моделирование функционирования системы, разработка методов, алгоритмов и программ расчета, анализа и прогнозирования надежности сложных систем,

- проведение полевых испытаний на надежность в различных условиях эксплуатации;
- организация технической эксплуатации, обеспечивающей сохранении параметров надежности в течение жизненного цикла системы;
- поиск, разработка и внедрение методов и способов обеспечения и повышения надежности работоспособности сложных систем при недостаточной надежности составляющих ее элементов.

Первый из приведенных вопросов является определяющим, поскольку от его решения прямо или косвенно зависят остальные. Именно поэтому разработка методов показателей надежности сложных технических систем представляется важной и актуальной задачей. В свою очередь, для вычисления показателей надежности сложных технических систем требуется разработка имитационной математической модели, алгоритмов и прикладных программ для ЭВМ, цифровых двойников. Предлагается, с учетом имеющихся наработок осуществить разработку метода показателей надежности сложных систем с зависимыми отказами, включая алгоритм ее машинной реализации для разработки программного приложения, имитирующего цифрового двойника технической системы, необходимого для проведения с ним экспериментов по вычислению показателей надежности.

Постановка задачи

Под сложными системами с зависимыми отказами будем понимать технические устройства с большим числом элементов, соединение которых в систему не сводится к параллельно-последовательному. Зависимость элементов понимается в том смысле, что отказ каких-либо элементов меняет режим работы других элементов или на совокупность элементов влияет общий случайный фактор [11].

Представляет интерес выбор достаточно универсального метода построения математической модели надежности, обладающей необходимой общностью для описания сложных систем с зависимыми отказами. Общим и универсальным методом построения математических моделей надежности является метод непосредственного подсчета показателей надежности сложных систем, основанный на положениях теории вероятности и теории множеств. Однако этот подход требует высокой степени подготовки исследователя и значительного времени для построения конкретной математической модели.

- В случае экспоненциального закона распределения вероятностей времени работы элементов (пуассоновского потока отказов) расчет может проводиться на основе марковской модели с дискретными состояниями и непрерывным временем [12, 13]. В этом случае на основании словесного описания структуры и зависимости между элементами и принципа функционирования и восстановления работоспособности системы определяется множество возможных состояний системы. По известному критерию отказов элементов все состояния делятся на два класса: работоспособности и отказа. Далее строится граф переходов, вершинами которого являются возможные состояния системы, а ребрами –критерии отказа элементов;
- законы распределения вероятностей времени безотказной работы элементов;
- законы распределения вероятностей времени восстановления элементов;
- описание зависимости элементов;
- описание структуры элементов.

Исходные данные непосредственно являются параметрами для генерации соответствующего алгоритма анализа и получения численных значений показателей надежности. Такая схема имеет место при использовании метода статистического моделирования, основным недостатком которого является высокая длительность вычислений. В случае, если необходимо определить вероятностные показатели системы при известных вероятностных показателях работоспособности (отказа) элементов, то в этом случае может быть реализован общий логико-вероятностный алгоритм [16]. Ниже приведен логико-вероятностный подход к построению общего алгоритма и программы для случая структурно-сложных систем с зависимыми отказами и его сравнение с алгоритмом статистического моделирования.

Функция работоспособности (отказа) сложной системы представляется в дизъюнктивной (конъюнктивной) форме, а именно:

$$y = f(X_1, X_2, \ldots, X_n) = \vee_{i=1}^{m} K_i\ , \quad i \leq 2^n \tag{1}$$

где: $X_1, X_2, \ldots, X_n$ — элементы сложной системы;
K_i — элементарная конъюнкция ранга;
$K_i = X_1^{б_1} * X_2^{б_2} * \ldots * X_r^{б_r},\ r \leq n;$

$$X^{б} = \{\begin{matrix} X & б = 1 \\ \overline{X} & б = 0 \end{matrix};$$

m — число элементарных конъюнкций в описании структуры сложной системы.

В данном выражении предполагается, то между элементами X_j существует вероятностная зависимость, то есть отказ некоторых элементов приводит к изменению вероятности отказа других элементов. В общем случае для любого элемента можно записать:

$$X_j^{б_j} \mid X_1^{б_1} X_2^{б_2} \dots X_{j-1}^{б_{j-1}} X_{j+1}^{б_{j+1}} \dots X_m^{б_m}, \quad \text{где } m > n$$

При этом каждый элемент характеризуется условной вероятностью:

$$P(X_j^{б_j} \mid X_1^{б_1} X_2^{б_2} \dots X_{j-1}^{б_{j-1}} X_{j+1}^{б_{j+1}} \dots X_m^{б_m})$$

Кроме того, для учета временной последовательности отказов элементов вводим вероятность реализации элементарных конъюнкций $P(Ki)$. Для данной модели оказывается справедливой теорема, рассмотренная в [17] о вероятности истинности произвольной функции алгебры логики, то есть для расчета показателей надежности сложных систем, описываемых моделью (1), необходимо представить эту модель в виде ортогональной дизъюнктивной нормальной формы (ОДНФ):

$$y = \vee_{i=1}^{m} K_i = K_1 V \overline{K_1} K_2 V \overline{K}_1 \overline{K}_2 K_3 V \dots V \overline{K}_1 \overline{K}_2 \dots \dots \overline{K}_1 \overline{K}_2 \dots \overline{K}_{m-1} K_m = \vee_{i=1}^{m} O_i, \quad (2)$$

где

$$O_i = \bigvee_{q=1}^{k} O_q^{`}$$

$$O_q^{`} = (X_1^{б} | X_2^{б_2} X_3^{б_3} \dots X_{m_1}^{б_{m_1}})(X_2^{б_2} | X_3^{б_3} \dots X_{m_2}^{б_{m_2}}) \dots$$

$$\dots(X_q^{б_q} | X_1^{б_1} \dots X_{m_q}^{б_{m_q}}),$$

то есть каждый элемент может быть зависимым от ряда других элементов.

При этом, если у элементарной конъюнкции $O_q^{`}$ отсутствует элемент X_p, от которого зависит элемент X_j, то элемент X_p должен быть введен в эту конъюнкцию на основании теоремы разложения, а именно:

$$O_q^{`} = X_1 X_2 \dots (X_j | X_p) \dots X_{p-1} X_{p+1} \dots X_{mq} =$$

$$= X_1 X_2 \dots [(X_j | X_p) X_p \vee (X_j | \bar{X}_p) \bar{X}_p] \dots X_{p-1} X_{p+1} \dots X_{mq}$$

Вероятность работоспособности (отказа) сложной системы при этом определяется выражением:

$$P(y) =$$

$$= \sum_{i=1}^{m} P\, [O_i (P(X_j^{б_j} | X_1^{б_1} \dots X_{j-1}^{б_{j-1}} X_{j+1}^{б_{j+1}} \dots X_m^{б_{jm}}))], \quad (4)$$

где $P(O_i)$ — вероятность реализации выражения O_i;

$P(X_j^{б_j} | X_1^{б_1} \dots X_{j-1}^{б_{j-1}} X_{j+1}^{б_{j+1}} \dots X_m^{б_m}$ — условная вероятность функционирования элемента.

Рассмотрим пример.

Пусть система, состоящая из двух приемопередатчиков (ПМ-ПД), работающих на различных направлениях связи, одного резервного ПМ-ПД, подключающегося при выходе любого из основных ПМ-ПД, и системы питания, включающей первичных источник (ПИ) — сеть переменного тока — и быстродействующий стабилизатор напряжения (СТ). При выходе из строя СТ возможно питание системы ПМ-ПД «в обход» стабилизатора (ОБХ) — непосредственно от ПИ.

Будем считать, что приоритеты направлений связи одинаковы и, следовательно, в случае, если резервный ПМ-ПД работает на одно из направлений связи (из-за выхода из строя основного ПМ-ПД, выход из строя другого ПМ-ПД не приведет к соответствующему переключению резервного ПМ-ПД. При выходе из строя СТ и питания системы ПМ-ПД через элемент ОБХ вероятность отказа ПМ-ПД возрастает, причем, при медленных изменениях питающего напряжения в определенных пределах, отказ ПМ-ПД происходит независимо друг от друга, а при быстрых изменениях питающего напряжения (импульсах) или медленных изменениях сверх определенных пределов отказ ПМ-ПД происходит одновременно и, следовательно, может рассматриваться как отказ ПИ.

На рис. 1 представлена структура рассматриваемой системы.

На рис. 1 введены обозначения: П$_1$ — ПМ-ПД одного направления связи, П$_2$ — ПМ-ПД другого направления связи, ПР — резервный ПМ-ПД.

Введем следующие формальные обозначения элементов: П$_1$ — X_1, П2 — X_2, ПР — X_3, СТ — X_4, ОБХ — X_5, ПИ — X_6.

Тогда исходя из работы системы можно произвести следующее описание зависимости элементов: $X_1|X_4$, $X_2|X_4$, $X_3|X_4$, $X_6|X_4$, то есть имеет место однократная зависимость 4-х элементов системы.

Для простоты вычислений примем следующие вероятности отказов элементов:

$$P(\bar{X}_1|\bar{X}_4) = P(\bar{X}_2|\bar{X}_4) = P(\bar{X}_3|\bar{X}_4) = P(\bar{X}_6|\bar{X}_4) = 0{,}2$$
$$P(\bar{X}_1|X_4) = P(\bar{X}_2|X_4) = P(\bar{X}_3|X_4) = P(\bar{X}_6|X_4) = 0{,}1$$
$$P(\bar{X}_4) = P(\bar{X}_5) = 0{,}1$$

Кроме этого, будем считать, что вероятность выхода одного из ПМ-ПД раньше другого одинакова для обоих ПМ-ПД и, следовательно, равна 0,5.

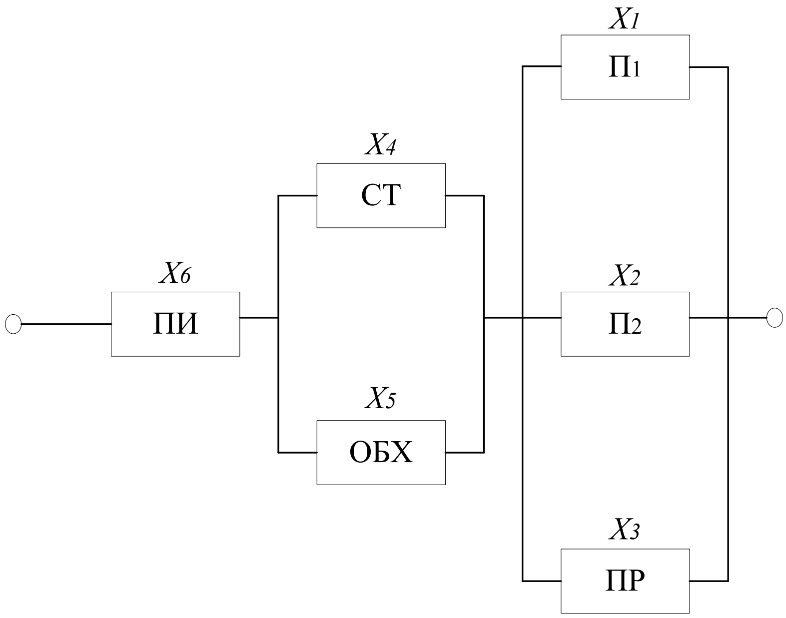

Рис. 1. Структура рассматриваемой системы

Тогда функция отказа первого направления связи может быть описана следующим образом (обозначает, что вероятность реализации данной конъюнкции равна 0,5 — учитывает временную последовательность выхода из строя П$_1$ и П$_2$):

$$\bar{y} = \bar{X}_6 V \bar{X}_4 \bar{X}_5 V \bar{X}_1 \bar{X}_3 V [\bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3]_{0.5} \tag{5}$$

После ортогонализации получим:

$$\bar{y} = \bar{X}_6 V \bar{X}_4 \bar{X}_5 X_6 V \bar{X}_1 \bar{X}_3 X_4 X_6 V \bar{X}_1 \bar{X}_3 \bar{X}_4 X_5 X_6 V$$
$$[\bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 \bar{X}_4 X_5 X_6]_{0.5}$$

или с учетом зависимости элементов:

$$\bar{y} = ((\bar{X}_6|X_4)X_4 V(\bar{X}_6|\bar{X}_4)\bar{X}_4)V\bar{X}_4\bar{X}_5(X_6|\bar{X}_4)V(\bar{X}_1|X_4)$$
$$(\bar{X}_3|X_4)X_4(X_6|X_4)V(\bar{X}_1|\bar{X}_4)$$
$$(\bar{X}_3|\bar{X}_4)\bar{X}_4X_5(X_6|\bar{X}_4)V[(\bar{X}_1|X_4)(\bar{X}_2|X_4)$$
$$(X_3|X_4)X_4(X_6|X_4)]_{0.5}V$$
$$[(\bar{X}_1|\bar{X}_4)(\bar{X}_2|\bar{X}_4)(X_3|\bar{X}_4)\bar{X}_4X_5(X_6\bar{X}_4)]_{0.5}$$

Переходя к вероятностной функции, получаем:

$$P(y) = \left(P(\bar{X}_6|X_4)P(X_4) + P(\bar{X}_6|\bar{X}_4)P(X_4)\right) +$$
$$+ P(\bar{X}_4)P(\bar{X}_5)P(X_6|\bar{X}_4) +$$
$$+P(\bar{X}_1|X_4)P(\bar{X}_3|X_4)P(X_4)P(X_6|X_4) +$$
$$+ P(\bar{X}_1|X_4)P(\bar{X}_3|X_4)P(X_5)\,P(\bar{X}_6|\bar{X}_4)$$
$$+ 0{,}5[P\left((\bar{X}_1|X_4)P(\bar{X}_2|X_4)P(X_3|X_4)P(X_4)P(X_6|X_4)\right] +$$
$$+0{,}5[P(\bar{X}_1|\bar{X}_4)P(\bar{X}_2|\bar{X}_4)P(X_3|\bar{X}_4)P(\bar{X}_4)P(X_5)P(X_6|\bar{X}_4)]$$

Подставив значения вероятностей, получим результат $P(\bar{y}) = 0{,}134$.

Алгоритм преобразования

Алгоритм ортогонализации, изложенный в [18], плохо приспособлен для реализации на ЭВМ, так как предусматривает необходимость производства большого числа операций типа $X{*}X{=}X$, а также операций перемножения полных булевых матриц, что существенно усложняет разработку программного обеспечения, задействует ограниченные ресурсы средств вычислительной техники и серверного оборудования.

Ниже предлагается алгоритм, свободный от указанных недостатков. Алгоритм основан на попарном сравнении элементарных конъюнкций в исходной дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) и их анализе на совместимость и выделении несовместных конъюнкций путем последовательного применения теоремы разложения.

При этом используются отношения:

- совместность: $A \cap B \neq 0$,
  например, $A{=}X_1X_2X_5$, $B = X_1X_2\bar{X}_3$,
  $(X_1X_2X_5) \cap (X_1X_2\bar{X}_3) = X_1X_2\bar{X}_3X_5 \neq 0$;
- включение: $A \subset B = B$, например, $A{=}X_1X_2X_5$,
  $B = X_1X_2$, $(X_1X_2X_5) \subset (X_1X_2) = X_1X_2$;
- ортогональность: $A \cap B = 0$, например,
  $A{=}X_1X_2X_5$, $B = \bar{X}_1X_5$, $(X_1X_2X_5) \cap (\bar{X}_1X_5) = 0$.

Алгоритм преобразования представлен на рис. 2.

Пояснения к алгоритму:

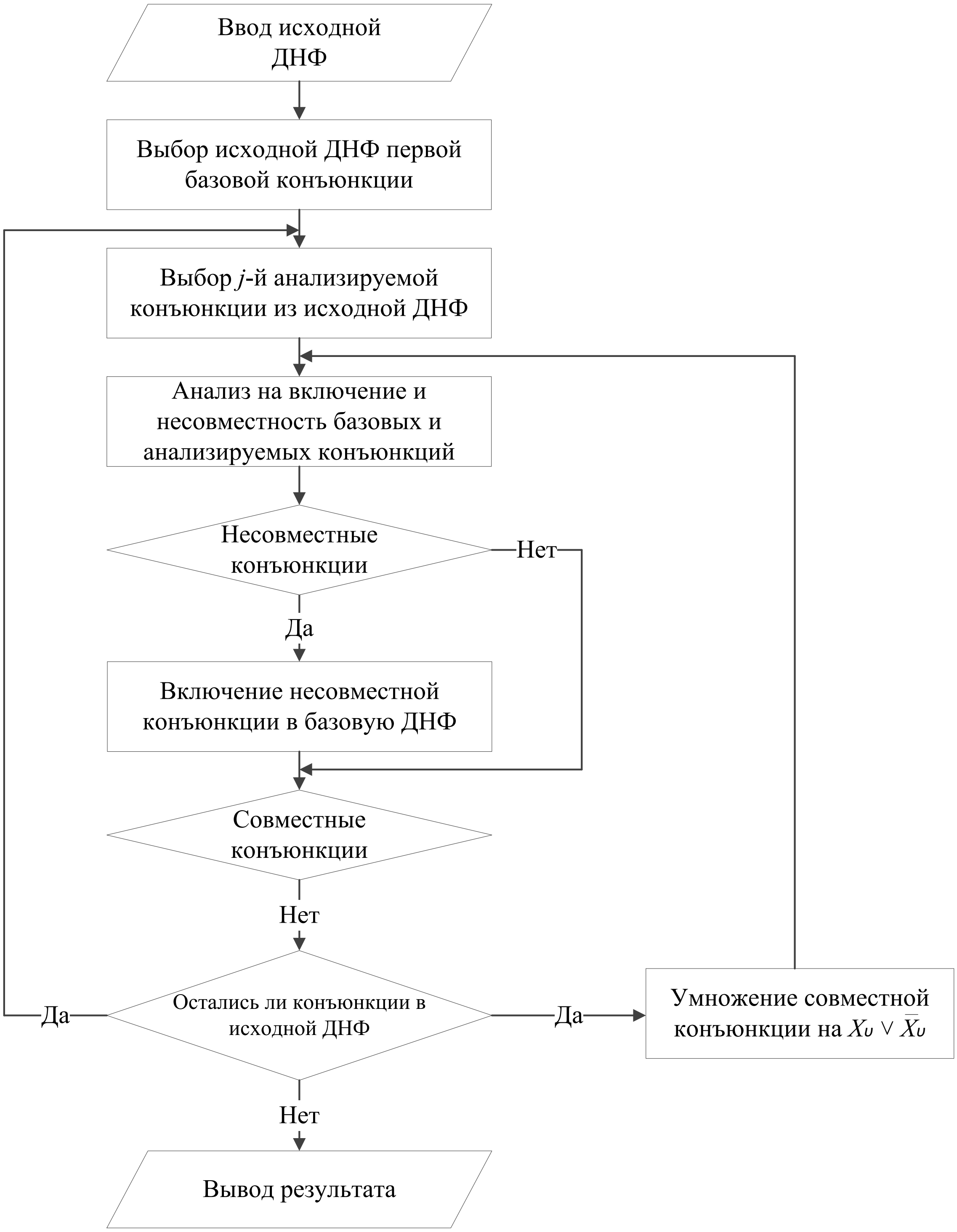

Рис. 2. Алгоритм преобразования, основанный на попарном сравнении элементарных конъюнкций

- первая базовая конъюнкция — это конъюнкция минимального ранга, входящая в исходную ДНФ;
- υ — номер элемента, отсутствующего в анализируемой конъюнкции, но имеющегося в базовой конъюнкции, с которой эта конъюнкция совместна.

При проведении анализа конъюнкции из исходной ДНФ переводятся в базовую ДНФ (с соответствующими преобразованиями), поэтому условие «остались ли конъюнкции в исходной ДРФ?» означает: «все ли конъюнкции, входящие в исходную ДНФ, проанализированы?».

Таблица 1. Ортогональная форма представления исходной ДНФ

Базовая (ортогональная) ДНФ	Проверяемые конъюнкции	Результат анализа	Недостающие элементы и действия
X_1X_4	X_2X_5 $X_1X_2X_5$ $\bar{X}_1X_2X_5$ $X_1X_2X_4X_5$ $X_1X_2\bar{X}_4X_5$	Совместность Совместность Несовместность Включение Несовместность	$X_1 \vee \bar{X}_1$ $X_4 \vee \bar{X}_4$ * ** *
X_1X_4 $\bar{X}_1X_2X_5$ $X_1X_2\bar{X}_4X_5$	$X_1X_3X_5$ $X_1X_3X_4X_5$ $X_1X_3\bar{X}_4X_5$ $X_1X_2X_3\bar{X}_4X_5$ $X_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_4X_5$	Совместность Включение Совместность Включение Несовместность	$X_4 \vee \bar{X}_4$ ** $X_2 \vee \bar{X}_2$ ** *
X_1X_4 $\bar{X}_1X_2X_5$ $X_1X_2\bar{X}_4X_5$ $X_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_4X_5$	$X_2X_3X_4$ $X_1X_2X_3X_4$ $\bar{X}_1X_2X_3X_4$ $\bar{X}_1X_2X_3X_4X_5$ $\bar{X}_1X_2X_3X_4\bar{X}_5$	Совместность Включение Совместность Включение Несовместность	$X_1 \vee \bar{X}_1$ ** $X_5 \vee \bar{X}_5$ ** *

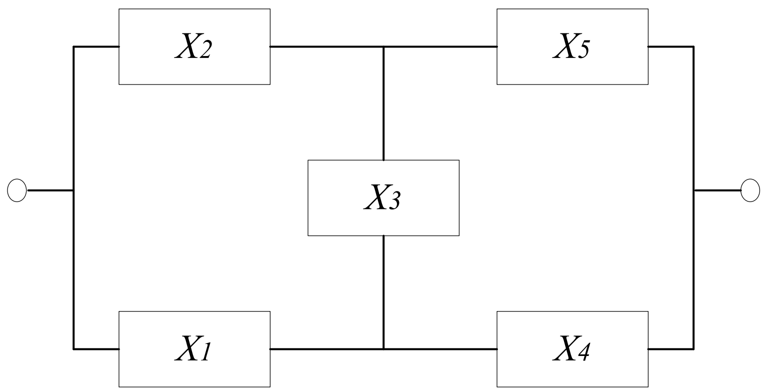

Рис. 3. Функция работоспособности мостиковой структуры

Рассмотрим пример.

Функция работоспособности мостиковой структуры (рис. 3) имеет вид:

$$y = X_1X_4VX_2X_5VX_1X_3X_5VX_2X_3X_4 \qquad (6)$$

Преобразования исходной ДНФ в ортогональную форму представлены в виде табл. 1.

Таким образом соответствующая ортогональная ДРФ имеет вид:

$$y = X_1X_4V\bar{X}_1X_2X_5VX_1X_2\bar{X}_4X_5VX_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_4X_5V.$$
$$V\bar{X}_1X_2X_3X_4X_5$$

В качестве другого примера рассмотрим преобразование функции (5), приведенное в табл. 2.

В табл. 1 и 2 введены обозначения:

- * –запись функционирования сложной системы в виде функции работоспособности (отказа) в виде дизъюнктивной нормальной формы (ДНФ);
- описание зависимости элементов;
- преобразование исходной ДНФ в ортогональную ДНФ (ОДНФ);
- разложение конъюнкций ОДНФ по недостающим элементам;
- вычисление вероятности работоспособности (отказа).

Таблица 2. Преобразование функции отказа первого направления связи

Базовая (ортогональная) ДНФ	Анализируемые элементарные конъюнкции	Результат анализа	Действия
$\bar{X}_6$ $\bar{X}_4\bar{X}_5X_6$	$\bar{X}_4\bar{X}_5$ $\bar{X}_4\bar{X}_5X_6$ $\bar{X}_4\bar{X}_5\bar{X}_6$	Совместность Несовместность Включение	$X_6 \vee \bar{X}_6$ * **
$\bar{X}_1\bar{X}_3X_4X_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_3\bar{X}_4X_5X_6$	$\bar{X}_1\bar{X}_3$ $\bar{X}_1\bar{X}_3X_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_3\bar{X}_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_3X_4X_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_3\bar{X}_4X_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_3\bar{X}_4X_5X_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_3\bar{X}_4\bar{X}_5X_6$	Совместность Совместность Включение Несовместность Совместность Несовместность Включение	$X_6 \vee \bar{X}_6$ $X_4 \vee \bar{X}_4$ ** * $X_5 \vee \bar{X}_5$ * **
$\bar{X}_1\bar{X}_2X_3X_4X_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_4X_5X_6$	$\bar{X}_1\bar{X}_2X_3$ $\bar{X}_1\bar{X}_2X_3X_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_2X_3X_4X_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_4X_6$ $\bar{X}_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_4X_5X_6$ $\bar{X}_1X_2X_3\bar{X}_4\bar{X}_5X_6$	Совместность Совместность Включение Несовместность Совместность Несовместность Включение	$X_6 \vee \bar{X}_6$ $X_4 \vee \bar{X}_4$ ** * $X_5 \vee \bar{X}_5$ * **

Элементом новизны предлагаемого решения является высокопроизводительный алгоритм расчета показателей надежности сложных систем с зависимыми отказами, основанный на попарном сравнении элементарных конъюнкций в исходной дизъюнктивной нормальной форме и их анализе на совместимость и выделении несовместных конъюнкций путем последовательного применения теоремы разложения. Отличием от традиционного алгоритма является его относительная простота, позволяющая оптимизировать трудозатраты при программировании и доступность при практическом использовании специалистами, имеющими минимальный уровень подготовки.

Для автоматизации предложенного алгоритма автором разработано прикладное программное обеспечение, работающее в соответствии с разработанной методикой, являющееся частью промышленного программного комплекса, позволяющего осуществлять разработку цифрового двойника и проводить имитационное моделирование практически любой сложной технической системы с зависимыми отказами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлев Д.М., Пинчук В.Н. Предприятие. Технологии и экономика цифровой трансформации. — Новосибирск: Академиздат, 2020. — 216 с.
2. Волков И.К., Загоруйко Е.А. Исследование операций: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. — М.: Изд-во МГУТ им. Н.Э. Баумана, 2000. — 436 с.
3. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 57.
4. Левин В.И. Логические методы теории надежности сложных систем. — Пенза: ПГТА, 2010. — 139 с.
5. Левин В.И. Непрерывная логика и анализ надежности сложных систем. Математический аппарат // Информационные технологии. 2019. Т. 25. № 4. С. 195–204. DOI: 10.17587/it.25.195–204.
6. Калмыков Е.В., Аитов Р.Н., Нестеров О.С. Повышение надежности эксплуатации инженерно-технических систем путем совершенствования системы поддержания в готовности // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2019. № S2 (3). С. 204–214.
7. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. № 6. С. 58–70.
8. Гуров С.В. Методы и модели анализа надежности сложных технических систем с переменной структурой и произвольными законами распределений случайных параметров, отказов и восстановлений: дис. … д-ра техн. наук: 05.13.01. — СПб., — 1997. — 325 с.

9. Дубенко Ю.В., Дышкант Е.Е., Вандина А.И. Разработка блока прогнозирования показателей сложной технической системы // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2018. № 3. С. 555–568.
10. Петухов И.С., Смирнова Н.Н. Моделирование структурно-сложных технических систем для решения задач оценки надежности, безопасности и переключения технических средств // Информационно-управляющие системы. 2007. № 6 (31). С. 11–19.
11. Шнепс-Шнеппе М.А. Исследование операций. — Рига: ЛГУ, 1990. — 171 с.
12. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Корректность марковских моделей с дискретными состояниями и непрерывным временем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 1. С. 40–49. DOI: 10.17586/0021–3454–2019–62–1–40–49.
13. Алиев Т.И. Распределение приоритетов в системах с вероятностными ограничениями // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 6. С. 415–420. DOI: 10.17586/0021–3454–2015–58–6–415–420.
14. Юрков Н.К., Алмаметов В.Б., Држевецкий Ю.А. Методология экспертных систем в анализе надежности сложных технических систем // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2010. Т. 2. С. 439–440.
15. Рябинин И.А. Логико-вероятностный анализ и его современные возможности // Биосфера. 2010. Т. 2. № 1. С. 23–28.
16. Трегубов Р.Б., Саитов И.А. Применение алгебры логики для формализации и решения задач анализа надежности структурно-сложных распределенных систем // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8. № 3 (34). С. 141.
17. Рябинин И.А., Черкасов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. — М.: Радио и связь, 1981. — 264 с.
18. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. — М.: КноРус, 2018. — 192 с.

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана