

УДК 519.876.5:62-192

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ НАДЁЖНОСТИ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР

Е.И. Сукач, Д.В. Ратобыльская, С.Ф. Маслович, Т.Я. Каморникова

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

AN APPROACH TO THE ASSESSMENT OF RELIABILITY OF NETWORKS

E.I. Sukach, D.V. Ratobylskaya, S.F. Maslovich, T.Y. Kamornikova

F. Scorina Gomel State University, Gomel

Рассматривается один из подходов к оценке вероятностных характеристик надёжности сетевых структур, имеющих два входа и два выхода. Подход основан на выделении вероятностных состояний надёжности сетевых структур, разработанных в рамках аппарата вероятностно-алгебраического моделирования и реализует предварительные расчёты при оценке надёжности сетевых структур большой размерности.

Ключевые слова: структурно-сложная система, сетевая надёжность, вероятностные оценки надёжности.

One of the approaches to the estimation of the probability characteristics of the reliability of networks with two inputs and two outputs is considered. The approach is based on the allocation of probability state security networks, developed as part of the apparatus of probability-algebraic simulation and implementing preliminary calculations when assessing the reliability of large-scale networks.

Keywords: structurally-difficult system, network reliability, probabilistic reliability assessment.

Введение

Надёжность сетевых структур, являющихся образом сложных многокомпонентных систем, определяется надёжностью компонентов, которым при графической интерпретации соответствуют вершины графа или его рёбра.

Если надёжность сетевой структуры, включающей множество компонентов, определить как работоспособность всех её компонентов, то во многих случаях она может оказаться равной нулю. Если же определить надёжность сети как возможность соединения между выбранным множеством её компонентов, то её надёжность окажется практически равной единице. При этом для некоторых компонентов, которые не попали в это множество, сетевую структуру нельзя будет считать абсолютно надёжной. Примером такого рода объекта исследования является сеть Интернет, надёжность которой можно считать равной нулю по первому определению, поскольку всегда найдется неисправный или отключенный узел. А по второму определению, её можно считать абсолютно надёжной, поскольку она обеспечивает возможность коммуникации большого числа удалённых узлов. Выходом из возникшей ситуации является переход к вероятностной оценке надёжности сетевой структуры по вероятностным составляющим надёжности её компонентов.

Следует отметить, что отдельные её компоненты могут по-разному влиять на работу сети в целом. Это видно на примере сети Интернет. Выход из строя терминального узла создает проблемы ее пользователю, а отказ сервера сказывается на работе всех его клиентов, в том числе и

удаленных. Кроме этого, отказ в доступе к определенному сетевому ресурсу часто связан не с отказом оборудования или программы, а просто с перегрузкой линий связи сети. Поэтому сетевую структуру следует рассматривать как неоднородно-ненадёжную структурно-сложную графовую систему, неоднородность которой может относиться как к узлам, так и к рёбрам.

В качестве исходных данных при оценке надёжности сетевых структур используются вероятностные значения надёжности отдельных узлов и линий связи (время наработки на отказ или вероятность отказа за оговоренный период времени), вычисленные или измеренные с учетом случайных факторов. При этом учитывается режим работы исследуемой сети: работа в среднем или функционирование в экстремальных условиях.

Общим свойством известных математических методов [1]–[3], ориентированных на расчёт надёжности сложных систем, является их формализация в виде графовых структур, имеющих один вход (начальная вершина) и один выход (конечная вершина), что ограничивает применение методов при рассмотрении систем со множеством входов и выходов. Часто для упрощения задачи делается предположение об идентичности распределений и даже равенстве вероятностей отказа для всех узлов. Понятно, что такие предположения делают полученный результат весьма приблизительным [3]. По этой причине даже оценки границ надёжности довольно часто корректны лишь по порядку величины.

Во многих случаях, когда требуется получить оценку надёжности конкретной сети, неплохие результаты могут дать расчеты с использованием метода Монте-Карло [4], [5]. Однако они требуют больших вычислительных ресурсов для решения поставленной задачи. Кроме этого, методы реализуют алгоритмы, которые из-за сложности вычислений либо позволяют оценить надёжность сетей с ограниченным числом узлов, либо ориентированы на оценку возможных границ надёжности.

В статье излагается один из подходов для оценки неоднородно-ненадёжных сетевых структур, являющихся образом сложных систем-четырёхполосников, то есть систем, имеющих два входа и два выхода. Подход реализован в виде методики расчёта надёжности, которая разработана в рамках вероятностно-алгебраического аппарата [6], позволяющего оценить вероятностные характеристики надёжности системы по вероятностным характеристикам надёжности её компонентов. Она обеспечивает определение точных вероятностных оценок надёжности сетевых структур в виде векторов вероятностей результирующих состояний систем. Сформированные вектора позволяют получить вероятностные оценки исследуемого показателя надёжности для различных сочетаний заданных полюсов, а также являются исходными данными при вероятностно-алгебраическом умножении структур-четырёхполосников.

Универсальность методики заключается в возможности её распространения на случаи оценки надёжности n -полосников ($n > 4$), структурные компоненты которых (линии связи, узлы) имеют как два состояния (работа, отказ), так и конечное множество состояний, характеризующее различные уровни исследуемого показателя надёжности. В случае рассмотрения множества состояний компонентов, составляющих четырёхполосник, применяется методика оценки надёжности структурно-сложных систем, основанная на сведении модели системы со многими состояниями к совокупности бинарных моделей с двумя состояниями [7], разработанная для оценки надёжности сетевых структур с одним входом и одним выходом.

1 Математическая постановка задачи

Объектом исследования является сетевая структура $G(N, K)$, где $N = \{N_v\}, v = \overline{1, l}$ – множество вершин графа, которые соответствуют абсолютно надёжным узлам сети, а $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ – рёбра графа, описывающие линии связи между узлами и имеющие вероятностные значения надёжности.

В графе выделяются четыре вершины-полюса $N_1, N_2, N_3, N_4 \in N$, две из которых задают

начальные вершины структуры $N_1, N_2 \in N$, а две оставшиеся $N_3, N_4 \in N$ определяют конечные вершины.

Простейшая схема структуры-четырёхполосника представляется полным графом, изображённым на рисунке 1.1. В общем случае схема структуры-четырёхполосника представляется произвольным графом, имеющим конечное число рёбер и конечное число вершин, четыре из которых выбраны в качестве полюсов.

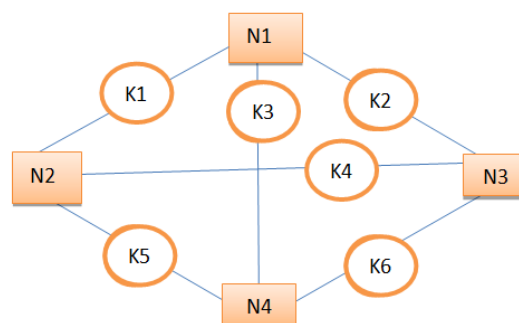


Рисунок 1.1 – Графовая схема структуры-четырёхполосника

Как видно из рисунка, граф имеет четыре вершины и описывает структуру, включающую шесть компонентов, то есть $N = \{N_v\}, v = \overline{1, 4}$, $K = \{K_i\}, i = \overline{1, 6}$. Для выбранной сетевой структуры все вершины являются полюсами. Множество входов задаётся вершинами $N_1, N_2 \in N$, а множество выходов – $N_3, N_4 \in N$. Аналитическим представлением указанного четырёхполосника является матрица смежности:

$$MS = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

На множестве вершин графа $G(N, K)$ определим отношение связности R как отображение $R: A \times B \rightarrow \{1, 0\}$, где значение 1 соответствует «истине», а значение 0 – «лжи». Отношение связности является отношением эквивалентности и разбивает множество вершин N на классы эквивалентности, то есть на непересекающиеся подмножества попарно эквивалентных элементов.

Для множества N , мощность которого $|N|$ известна, число классов эквивалентности рассчитывается по известному алгоритму и описывается числами Белла [8]. Числа Белла указывают на количество непересекающихся подмножеств эквивалентных вершин, покрывающее все множество вершин N .

Для сетевых структур-четырёхполосников $|N|=4$, а число классов эквивалентности $B_n = 15$.

Они определяют 15 результирующих состояний $S = \{S_j\}, j = \overline{1,15}$, характеризующих уровни надёжности сети. В графе им соответствует множество компонент связности. В таблице 1.1 представлены состояния надёжности сети и их графическая интерпретация.

Например, состояние S_2 , характеризует состояние сети, в которой существует связь между вершинами N_1 и N_2 . Состояние S_6 определяет состояние сети, в которой имеются связи между узлами $N_1, N_2, N_3 \in N$. Аналогично описываются все состояния, соответствующие различным вариантам работы сети.

Возвращаясь к графической интерпретации сетевой структуры, можно констатировать, что граф $G(N, K)$ является взвешенным, поскольку его рёбра имеют веса x_i , соответствующие возможным состояниям надёжности линий связи $S = \{S_j\}, j = \overline{1,2}$. Веса ребер графа $G(N, K)$ принимают значения $x_i = 1 \vee 0$ с заданными вероятностями:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{с вероятностью } q_i; \\ 0, & \text{с вероятностью } (1 - q_i). \end{cases} \quad (1.1)$$

Вероятность q_i определяет надёжность линии связи и наличие ребра графе $x_i = 1$. С вероятностью $(q_i - 1)$ линия связи отказала, и в графе нет связи между соответствующими вершинами графа.

Таким образом, $G(N, K)$ является случайным графом, имеющим множество реализаций в виде детерминированных графов. Матрица смежности, описывающая случайный граф (рисунок 1.1), имеет вид:

$$MSX = \begin{pmatrix} 0 & x_1 & x_2 & x_3 \\ x_1 & 0 & x_4 & x_5 \\ x_2 & x_4 & 0 & x_6 \\ x_3 & x_5 & x_6 & 0 \end{pmatrix},$$

где $x_i, i = \overline{1,6}$ – переменные, принимающие одно из возможных значений (0 или 1) при реализациях случайного графа.

Поскольку граф является образом структуры-четырёхполюсника, то каждой его реализации соответствует одно из возможных 15 состояний структуры, имеющее свою вероятность, которая зависит от вероятностей весов его рёбер. Число реализаций случайного графа зависит от количества его рёбер и числа возможных значений их весов. В графе, представленном на рисунке 1.1, имеется шесть рёбер, и их веса могут принимать два возможных значения $x_i = 1 \vee 0$, соответственно число всех реализаций случайного графа будет $2^6=64$.

Каждой k -ой реализации $G_k(N, K)$ случайного графа $G(N, K)$ поставим в соответствие

значение связности j_k , характеризующее вариант связи вершин-полюсов детерминированного графа $G_k(N, K)$ и позволяющее интерпретировать граф как состояние $S = \{S_j\}, j = \overline{1,15}$ исследуемой структуры.

Таблица 1.1 – Описание состояний надёжности структуры-четырёхполюсника

Состояние	Графическая интерпретация	Представление в виде множества связанных вершин
S_1		$\{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}\}$
S_2		$\{\{1,2\}, \{3\}, \{4\}\}$
S_3		$\{\{1,3\}, \{2\}, \{4\}\}$
S_4		$\{\{1,4\}, \{2\}, \{3\}\}$
S_5		$\{\{2,3\}, \{1\}, \{4\}\}$
S_6		$\{\{1,2,3\}, \{4\}\}$
S_7		$\{\{1,4\}, \{2,3\}\}$
S_8		$\{\{2,4\}, \{1\}, \{3\}\}$
S_9		$\{\{1,3\}, \{2,4\}\}$
S_{10}		$\{\{1,2,4\}, \{3\}\}$
S_{11}		$\{\{3,4\}, \{1\}, \{2\}\}$
S_{12}		$\{\{1,2\}, \{3,4\}\}$
S_{13}		$\{\{1,3,4\}, \{2\}\}$
S_{14}		$\{\{2,3,4\}, \{1\}\}$
S_{15}		$\{1,2,3,4\}$

Для двух граничных состояний исследуемой структуры S_1 (отказ) и S_{15} (полная работоспособность) значение связности $j_k = 0 \vee 1$. При этом для k -ых реализаций $G_k(N, K)$ графа, описывающих эти состояния, выполняется свойство j_k - связности, которое означает наличие пути, соединяющего четыре вершины $N_1, N_2, N_3, N_4 \in N$ в графе, в котором веса ребер удовлетворяют следующему условию: $\min_i(x_i) \geq j_k$.

Таким образом, будем считать, что сетевая структура находится в состоянии надёжности S_1 (отказ), если её графическим образом является 0-связный граф. Реализации случайного графа, для которых выполняется свойство 0-связности, принадлежат множеству $G_0 = \{G_0(N, K)\}$ и описывают варианты отказа исследуемой структуры.

Если для k -ой реализации случайного графа выполняется свойство 1-связности, то будем считать, что структура находится в S_{15} состоянии (полная работоспособность). При этом все реализации случайного графа образуют множество $G_1 = \{G_1(N, K)\}$, описывающее варианты реализации надёжной работы исследуемой структуры. Для таких графов всегда существует путь, соединяющий четыре вершины, являющиеся полюсами, все ребра которого имеют веса $x_i = 1$.

Очевидно, что для исследуемой структуры четырёхполюсника имеется множество промежуточных результирующих состояний, описывающих варианты частичного функционирования структуры, которым при формализации сопоставим k -ые реализации случайного графа $G_k(N, K)$, дающие значение связности $j_k = \overline{2, 14}$. При этом k -ые реализации случайного графа будут отнесены к одному из множеств $G_{pr} = \{G_{pr}(N, K)\}$, $pr = \overline{2, 14}$.

Ставится задача определения вектора вероятностей состояний надёжности исследуемой структуры, имеющей два входа и два выхода:

$$P^s = (p_1^s, p_2^s, \dots, p_{15}^s), \sum_{j=1}^{15} p_j^s = 1. \quad (1.2)$$

Состояния структуры идентифицируются в результате определения значений связности j_k возможных реализаций графа $G(N, K)$. Вероятности каждого из состояний определяются интегральной вероятностью реализаций графа, дающих j_k -ое значение связности и образующих в совокупности одно из следующих множеств:

$$\begin{aligned} G_1 &= \{G_1(N, K)\}, \\ G_0 &= \{G_0(N, K)\}, \\ G_{pr} &= \{G_{pr}(N, K)\}, pr = \overline{2, 14}. \end{aligned}$$

2 Методика определения вероятностных состояний надёжности четырёхполюсников по вероятностным состояниям надёжности их компонентов

Оценка вероятностей состояний надёжности структур-четырёхполюсников реализуется с использованием системы вероятностно-алгебраического моделирования (Probability-Algebraic Simulation, PALS) [9] следующей последовательностью шагов:

Шаг 1. Формулируется постановка задачи расчёта показателя надёжности сетевой структуры

путем вербально-графического описания условий ее функционирования и отказа. С этой целью определяется множество элементарных компонентов: $N = \{N_v\}, v = \overline{1, l}$ и $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$, устанавливаются связи между компонентами, задается число состояний надёжности линий связи $S = \{S_j\}, j = \overline{1, 2}$.

Линиям связи сопоставляются рёбра графа, а узлам сетевой структуры ставятся в соответствие вершины. Определяются две вершины, являющиеся входом в систему, и две вершины, определяющие выходы из сетевой структуры. Графическая схема исследуемой структуры $G(N, K)$ формируется в диалоговом режиме с использованием стандартных графических примитивов: вершин и ребер.

Шаг 2. Определяются пути получения исходных данных вероятностных параметров компонентов разрабатываемой графовой модели. Как правило, исходные данные формируются на основе натурных экспериментов с прототипом исследуемой структуры или путем анализа экспертных оценок. В результате для каждой линии связи соответственно выделенным состояниям $S = \{S_j\}, j = \overline{1, 2}$, задаются значения вероятностей надёжной работы (1.1).

Шаг 3. Определяется состав выходных данных, представляющих собой вероятностные значения состояний надёжности исследуемой структуры (1.2) с учетом выбранного состава вершин-полюсов, и обосновываются способы их получения. Формулируется смысловое содержание выходных данных для всей структуры и её фрагментов.

Шаг 4. С использованием специализированных программных средств системы PALS осуществляется ввод подготовленных данных (структурных схем, параметров), необходимых для начала моделирования. При этом автоматизируется ввод исходных данных, контролируется корректность полученной информации, а результаты контроля выдаются пользователю для устранения ошибок в режиме «вопрос – ответ». Стандартизирована возможность получения данных из заранее подготовленных файлов с возможностью их редактирования и сохранения.

Шаг 5. Строится k -ая реализация случайного графа, аналитическим выражением которой является матрица MSX_k , в которой переменным x_i присвоено одно из возможных значений (1 или 0).

Шаг 6. Организуется итерационный процесс транзитивного замыкания графа [10], который заключается в формировании графа достижимости, то есть определении для каждой вершины графа множества достижимых из нее вершин по путям длины 0, 1, 2 и т. д. Поскольку исходный граф G задается своей матрицей смежности MSX_k , то формирование матрицы смежности графа достижимости реализуется по формуле:

$$MSX_G^h = (MSX_k + E_n)^h,$$

где MSX_G^h – матрица смежности транзитивного замыкания графа G , E_n – единичная матрица размерности $n \times n$, h – степень, возведение в которую обеспечивает транзитивное замыкание графа G . При этом на каждой очередной l -ой ($l = \overline{1, h}$) итерации транзитивного замыкания реализуются преобразования элементов полученной матрицы MSX_G^l по формуле:

$$msx_G^l[i, j] = \begin{cases} 1, & \text{если } msx_G^l[i, j] \geq 1; \\ 0, & \text{если } msx_G^l[i, j] < 1. \end{cases}$$

Очевидно, что элементы преобразованной матрицы смежности MSX_G^l либо остаются без изменения, либо увеличиваются на 1, аналитически указывая на вершины графа (полюсы или внутренние вершины), в которые можно попасть за l шагов по рёбрам графа, имеющим веса $x_i = 1$. Так, после первой итерации процесса замыкания в матрице смежности MSX_G^1 элементы увеличиваются на 1 в столбцах, соответствующих вершинам графа, в которые можно попасть за два шага. Аналогично, в матрице смежности MSX_G^2 элементы увеличиваются на 1 в столбцах, соответствующих вершинам графа, в которые можно попасть за три шага и т. д.

Критерием остановки итерационного процесса транзитивного замыкания матрицы смежности является формирование матрицы MSX_G^h , сумма элементов которой выше главной диагонали остаётся неизменной, то есть выполняется условие:

$$\forall i, j, \text{ где } i < j \quad \sum_{i, j} msx_G^{h-1}[i, j] = \sum_{i, j} msx_G^h[i, j].$$

В том случае, если система представляется ориентированным графом, для транзитивного замыкания достаточно возвести матрицу смежности в $(n-1)$ -ую степень [10], то есть $h = (n-1)$.

Матрица смежности на конечном h -ом шаге однозначно определяет состояние связности j графа $G(N, K)$ для заданных вершин-полюсов и позволяет отнести k -ую реализацию случайного графа к одному из возможных состояний $S = \{S_j\}, j = \overline{1, 15}$. В частности, если выполняется условие

$$\forall i, j, \text{ где } i < j \quad msx_G^h[i, j] = 1,$$

то k -ой реализации случайного графа соответствует состояние S_{15} исследуемой структуры, при котором она полностью надёжна.

Шаг 7. Организуется вычисление вероятности p_k состояния $S_j, j = \overline{1, 15}$, соответствующего k -ой реализации случайного графа по формуле:

$$p_k = \prod_{i, x_i=1} q_i * \prod_{i, x_i=0} (1 - q_i).$$

Шаг 8. Формируются интегральные вероятностные оценки состояний надёжности четырёх-полюсника. Для получения вероятностной оценки состояния $S_j, j = \overline{1, 15}$ используется формула:

$$P(S_j) = \sum p_k,$$

где $k, G_k(N, K) \in G_w$,

$$w = \begin{cases} 0, & j = 1; \\ 1, & j = 15; \\ pr, & j = pr = \overline{2, 14}. \end{cases}$$

Очевидно, что сумма вероятностей всех состояний надёжности четырёхполюсника будет равна 1, то есть:

$$\sum_{j=1}^{15} P(S_j) = 1.$$

Шаг 9. Результаты расчёта графически отображаются в виде графиков, представляющих вероятностные значения состояний надёжности четырёхполюсника. Одновременно данные сохраняются в файле одного из стандартных форматов для последующей статистической обработки и анализа.

Шаг 10. В случае исследования реальной функционирующей сетевой структуры осуществляется проверка адекватности построенной модели реальному объекту. В PALS она автоматически проводится путем проверки близости средних значений откликов модели соответствующим характеристикам реальной системы. В случае отрицательных результатов осуществляется переход на шаг 1.

Шаг 11. Определяется влияние вероятностных значений состояний надёжности компонентов на значение компонентов вектора откликов всей сетевой структуры при ее фиксированной организации. С этой целью организуются модельные эксперименты, в которых варьируются значения вероятностей (1.1).

Шаг 12. Исследуется влияние структурной организации сети на результирующий вектор вероятностей состояний при неизменных вероятностных значениях параметров компонентов. При этом могут быть рассмотрены случаи альтернативной структурной организации сети, полученные в результате различных вариантов резервирования отдельных участков сети, а также варианты, соответствующие возможным аварийным ситуациям, возникающим в процессе эксплуатации сети. Сравнение результирующих векторов вероятностей состояний надёжности сети для различных вариантов ее структурной организации позволяет обосновать выбор лучшего из них, оценить эффективность резервирования отдельных участков и изменения состояний надёжности сетевой структуры в результате аварийного состояния отдельных участков.

3 Пример расчёта надёжности сетевой структуры

Рассмотрим структуру-четырёхполюсник, графовая схема которой представлена на рисунке 3.1. Как видно из рисунка, структура включает 12 линий связи, $K = \{K_i\}, i = \overline{1, 12}$, которым соответствуют рёбра графа, имеющего множество вершин $N = \{N_v\}, v = \overline{1, 7}$, четыре из которых выбраны в качестве полюсов $N_1, N_2, N_3, N_4 \in N$.

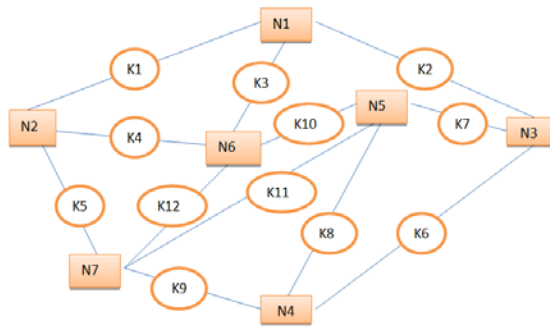


Рисунок 3.1 – Граф структуры-четырёхполюсника

Будем считать, что значения вероятностей надёжности линий связи, составляющих структуру, различны. В таблице 3.1 представлены варианты исходных значений вероятностей надёжной работы линий связи структуры, позволяющие провести сравнительный анализ их влияния на результирующие вероятностные значения надёжности исследуемой сети.

С использованием предложенного подхода к оценке надёжности сетевой структуры были

получены значения вектора вероятностей (1.2) для альтернативных вариантов надёжности линий связи, которые представлены в таблице 3.2.

На рисунке 3.2 приводится графическая интерпретация полученных результатов расчёта.

На рисунке выделяется два графика, соответствующие 1 и 2 прогону. Для прогона 1 использовались одинаковые значения вероятностей надёжности линий связи ($q=0.9$). При этом велика вероятность состояния S_{15} (полная надёжность). В прогоне 2 также использовались одинаковые значения вероятностей надёжности линий связи ($q=0.1$). При этом наблюдается преобладание результирующего состояния S_1 (отказ), вероятность которого 0.7. Вероятности всех остальных состояний для обоих прогонов изменяются на отрезке $[0, 0.1]$.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчёта надёжности структуры-четырёхполюсника, граф которой представлен на рисунке 4.1

Номер прогона	1	2	3	4	5
K_1	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1
K_2	0,9	0,1	0,9	0,1	0,1
K_3	0,9	0,1	0,1	0,1	0,9
K_4	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1
K_5	0,9	0,1	0,1	0,1	0,9
K_6	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1
K_7	0,9	0,1	0,1	0,9	0,9
K_8	0,9	0,1	0,1	0,9	0,1
K_9	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1
K_{10}	0,9	0,1	0,1	0,9	0,9
K_{11}	0,9	0,1	0,1	0,1	0,9
K_{12}	0,9	0,1	0,1	0,1	0,9

Таблица 4.2 – Результаты расчёта надёжности структуры-четырёхполюсника, граф которой представлен на рисунке 3.1

Номер прогона	1	2	3	4	5
S_1	2,64E-07	0,7011545576	0,0779060620	0,1119985926	0,0185459597
S_2	1,39E-05	0,0862715338	0,0095857260	0,0126856089	0,0593968548
S_3	3,31E-06	0,0785809920	0,7018294877	0,0180935059	0,0529036227
S_4	8,94E-07	0,0012297545	0,0001366394	0,0051959577	0,0011872392
S_5	8,94E-07	0,0012297545	0,0001366394	0,0060509872	0,0509726321
S_6	0,001019331	0,0100588207	0,0878377436	0,0042800487	0,5475212693
S_7	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
S_8	9,96E-06	0,0088427058	0,0009825229	0,0072747843	0,0015285030
S_9	9,02E-05	0,0009878373	0,0088480203	0,0008561391	0,0006003009
S_{10}	0,000984275	0,0014556176	0,0001617353	0,0022109251	0,0131309317
S_{11}	1,39E-05	0,0862715338	0,0095857260	0,5422218777	0,0036073596
S_{12}	0,00037035	0,0106051085	0,0011783454	0,0610301720	0,0073279515
S_{13}	0,001019331	0,0100588207	0,0878377436	0,1197671855	0,0189886294
S_{14}	0,000984275	0,0014556176	0,0001617353	0,0691792044	0,0191350340
S_{15}	0,995489174	0,0017973455	0,0138118733	0,0391550107	0,2051537120

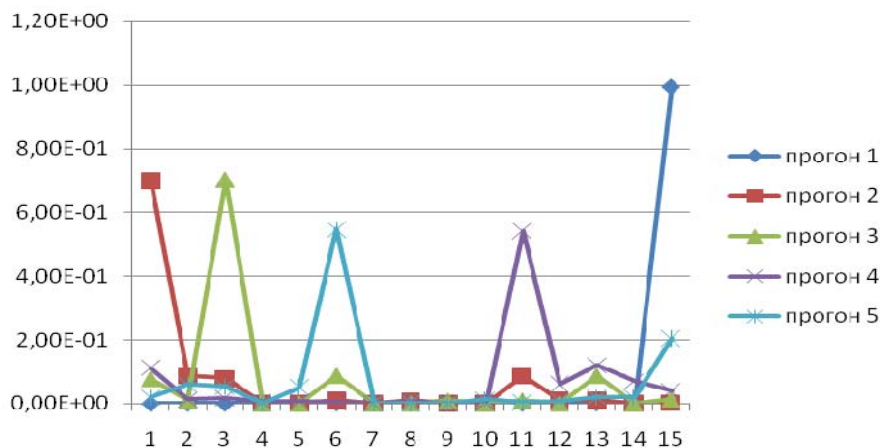


Рисунок 4.2 – Графическая интерпретация полученных результатов расчёта

Прогоны, в которых исследуется влияние отдельных линий связи $K_3, K_4, K_8, K_7, K_{10}, K_{11}, K_{12}$ на состояния структуры, дают практически сопоставимые результаты, при которых все состояния равновероятны и их вероятности изменяются в пределах $[1,0,1]$. При этом заметна большая вероятность состояния S_1 (отказ). Это свидетельствует о слабом влиянии каждой из перечисленных линий связи на результирующие состояния сети.

Для прогона 3, в котором увеличена вероятность надёжности линии связи K_2 до 0,9, а остальные компоненты имеют вероятность работоспособности 0,1, наблюдается увеличение вероятности результирующего состояния S_3 на 70% по сравнению с прогоном, в котором все вероятности надёжности линий связи 0,1.

Прогон 4 показывает влияние линий связи K_7, K_8, K_{10} на результирующие вероятности состояний исследуемой структуры. При малых значениях вероятностей всех состояний заметно выделяется большая составляющая вероятности состояния S_{11} , значение которой увеличивается на 40% по сравнению с прогоном, в котором все исходные вероятности надёжности линий связи равны 0,1 (прогон 2). Аналогичная ситуация наблюдается и при исследовании влияния повышения надёжности компонентов K_6, K_7, K_8 до 0,9. При этом вероятность результирующего состояния S_{11} увеличивается на 60%.

Прогон 5, в котором линии связи $K_3, K_5, K_7, K_{10}, K_{11}, K_{12}$ имеют исходные вероятности работоспособности 0,9, а все остальные – 0,1 приводит к заметному возрастанию вероятности состояния S_6 до 0,5. Остальные вероятности результирующих состояний находятся в интервале $[0,0,1]$.

Заключение

Предложенный подход к оценке надёжности сетевых структур предполагает рассмотрение

сети в виде четырёхполюсника и позволяет рассчитывать результирующие вероятности надёжности структуры по вероятностям надёжности составляющих её компонентов (линий связи, узлов).

Практическая значимость подхода заключается в возможности решения типовых задач проектного моделирования и анализа вероятностных характеристик надёжности большого класса неоднородно-ненадёжных сетевых структур, которые представляются в виде графов, имеющих два входа и два выхода, таких, как:

- оценка вероятностных характеристик надёжности сетевых структур-четырёхполюсников на основе вероятностных состояний их компонентов;
- выявление множества отдельных компонентов и их комбинаций, оказывающих существенное влияние на вероятностные значения выбранного показателя надёжности исследуемых структур;
- получение, обоснование и оптимизации различных проектных, эксплуатационных и управленческих решений на основе результатов расчёта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рябинин, И.А.* Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2007. – 276 с.
2. *Можаев, А.С.* Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем / А.С. Можаев // Труды третьей Международной научной школы «Моделирование и Анализ Безопасности и Риска (МА БР – 2003)», август 20–23, 2003 – СПб. – 517 с.
3. *Sahinoglu, M.* Network reliability evaluation / M. Sahinoglu, R. Benjamin // Wiley Interdisciplinary

Reviews: Computational Statistics, Volume 2 March / April 2010. – P. 189–211.

4. Максимей, И.В. Определение интегрального максимального потока в региональной сети с помощью имитационного моделирования / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, П.В. Гируц // Математические системы и машины. – 2008. – № 2. – С. 128–136.

5. Сукач, Е.И. Метод перераспределения автомобильных транспортных потоков региона на основе имитационного моделирования / Е.И. Сукач // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2008. – Т. 10, № 3. – С. 37–45.

6. Сукач, Е.И. Метод вероятностно-алгебраического моделирования надёжности функционально-сложных систем / Е.И. Сукач // Информатика. – 2010. – № 3. – С.18–30.

7. Сукач, Е.И. Подходы к снижению размерности многокомпонентных структурно-сложных систем со многими состояниями при оценке их надёжности / Е.И. Сукач // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3 (8). – С. 75–79.

8. Липский, В. Комбинаторика для программистов / В. Липский – М. : Мир, 1988.

9. Сукач, Е.И. Возможности программной системы вероятностно-алгебраического моделирования сложных систем / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобильская // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 4 (9). – С. 111–117.

10. Свами, М. Графы, сети и алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман. – М. : Мир, 1984.

Поступила в редакцию 09.03.12.