

Научная статья

УДК 004.056.53:519.2

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ С ТЫСЯЧАМИ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНЫХ BDD

Акопян Белла Кареновна, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-Петербург, akopian.bk@gmail.ru

Аннотация. Проблема экспоненциального роста вычислительной сложности при анализе крупномасштабных технических систем существенно ограничивает применимость классических аналитических методов оценки надёжности. В работе предложен декомпозиционный подход, базирующийся на строгом выделении статистически независимых модулей дерева отказов и последующем построении для них бинарных диаграмм решений. Представлен алгоритм выделения модулей на основе обхода в глубину и проверки непересекаемости множеств базовых событий. Это позволяет корректно объединять вероятности, рассчитанные для отдельных модулей, и исключать систематические погрешности, связанные с усечением минимальных сечений. Исследовано влияние эвристик упорядочивания переменных на размер диаграмм; экспериментально подтверждено преимущество предварительной сортировки аргументов логических вентилей по сравнению с обходом дерева без такой сортировки. Разработанный метод интегрирован в процедуру структурной оптимизации, где вычисление функции приспособленности генетического алгоритма осуществляется через локальное обновление модульных диаграмм, обеспечивая кратное ускорение поиска конфигураций при заданных массогабаритных и энергетических ограничениях. Вычислительный эксперимент на модели промышленного электроснабжения, содержащей более двух тысяч элементов, продемонстрировал полиномиальную зависимость

времени расчёта от размерности задачи и существенное сокращение пикового потребления оперативной памяти по сравнению с монолитным построением. Результаты подтверждают эффективность предложенного метода для точной количественной оценки структурной надёжности сложных инженерных объектов.

Ключевые слова: структурная надёжность, декомпозиция дерева отказов, бинарные диаграммы решений, модульная архитектура, вычислительная сложность, эвристики упорядочивания переменных, генетическая оптимизация, вероятность безотказной работы, системный анализ.

Original article

A DECOMPOSITION METHOD FOR ASSESSING THE STRUCTURAL RELIABILITY OF SYSTEMS WITH THOUSANDS OF ELEMENTS BASED ON MODULAR BDD

**Akopian Bella Karenovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint
Petersburg, Russia, akopian.bk@gmail.ru**

Abstract. The exponential growth of computational complexity in analyzing large-scale technical systems significantly limits the applicability of classical analytical methods for reliability assessment. This paper proposes a decomposition approach based on the rigorous identification of statistically independent fault tree modules and the subsequent construction of binary decision diagrams for them. A module search algorithm is formalized using depth-first traversal with a disjointness criterion for sets of base events, which guarantees the mathematical correctness of the multiplicative convolution of local probabilities and eliminates systematic errors inherent in truncation methods. Particular attention is paid to the influence of variable ordering heuristics on the resulting diagram dimensionality; the advantage of pre-sorting logic gate arguments over traditional traversal is experimentally confirmed. The developed

method is integrated into a structural optimization procedure, where the calculation of the fitness function of the genetic algorithm is performed through a local update of module diagrams, providing a multiple acceleration of the configuration search under given weight, size, and energy constraints. A computational experiment on an industrial power supply model containing over two thousand elements demonstrated a polynomial dependence of computation time on the problem size and a significant reduction in peak RAM consumption compared to a monolithic design. The results confirm the high effectiveness of the proposed mathematical framework for accurately quantifying the survivability of complex engineering structures.

Keywords: structural reliability, fault tree decomposition, binary decision diagrams, modular architecture, computational complexity, variable ordering heuristics, genetic optimization, probability of failure-free operation, systems analysis.

Введение. Формализация отказов крупных технических систем опирается на аппарат булевых моделей, в частности, на деревья отказов и схемы надёжности. Математическим фундаментом таких представлений выступают системы стохастических булевых уравнений. По мере масштабирования инженерных объектов, включающих тысячи базовых событий и логических вентилей, вычислительные процедуры сталкиваются с фундаментальным ограничением, выражающимся в комбинаторном взрыве [1-3]. Точное аналитическое вычисление вероятности вершинного события для подобных структур относится к классу $\#P$ -трудных задач, что делает прямое применение классических алгоритмов неэффективным [4]. Структурная сложность таких объектов приводит к тому, что количество минимальных сечений и дизъюнктивных путей возрастает экспоненциально, преодолевая пределы применимости даже наиболее оптимизированных процедур логического свёртывания.

Бинарные диаграммы решений позволяют точно вычислять вероятностные показатели на основе представления булевых функций в виде диаграмм. Однако

для особо крупных моделей, характерных для атомной энергетики или химической промышленности, построение единой диаграммы может оказаться невозможным из-за нехватки оперативной памяти [5], [6]. Объем требуемых вычислительных ресурсов при использовании монолитного подхода возрастает непропорционально быстро, что вынуждает исследователей отказываться от точных методов в пользу приближённых оценок, базирующихся на усечении минимальных сечений. Подобное упрощение, в свою очередь, порождает парадокс детализации, при котором дальнейшее углубление модели и декомпозиция базовых событий приводят к искусственному занижению итоговых вероятностей отказов из-за отсека значимых сценариев [7-9].

Для преодоления указанного вычислительного ограничения необходимо перейти от анализа системы как единого целого к декомпозиции модели на независимые модули. Подход предусматривает выделение в исходной структуре модулей — подграфов, множества базовых событий которых не пересекаются с множеством базовых событий остальной части модели. Выделение независимых модулей позволяет свести исходную задачу большой размерности к нескольким задачам меньшей размерности. Каждый выделенный модуль рассматривается как укрупнённое базовое событие, вероятность отказа которого вычисляется отдельно. Полученный результат затем используется в общей модели [10]. Это позволяет сократить вычислительные затраты без потери точности расчётов.

Модульная оценка надёжности основана на построении диаграмм для независимых подсистем и последующем объединении результатов. Такой способ расчёта снижает риск исчерпания оперативной памяти и позволяет не использовать приближения, связанные с отсечением маловероятных сценариев. Поэтому настоящее исследование направлено на разработку алгоритмов декомпозиции на основе модульных бинарных диаграмм решений, позволяющих точно оценивать структурную надёжность систем с тысячами взаимосвязанных элементов [11-13].

Обзор литературы. Проблема оценки надёжности крупномасштабных

технических систем, содержащих тысячи элементов, представляет собой одну из фундаментальных задач современного системного анализа. Традиционные методы анализа деревьев отказов, основанные на переборе минимальных сечений, сталкиваются с комбинаторным взрывом вычислительной сложности при увеличении размерности задачи [14]. Как отмечается в классическом руководстве по анализу деревьев отказов, разработанном Комиссией по ядерному регулированию США, количество минимальных сечений может возрасти экспоненциально с увеличением числа базовых событий и логических вентилей, что делает прямой перебор вычислительно неразрешимым для систем с $N > 1000$ элементов [15].

Бинарные диаграммы решений (BDD), предложенные Брайантом в середине 1980-х годов и адаптированные для задач анализа надёжности Раузи в начале 1990-х годов, предоставили принципиально новый вычислительный аппарат для точной оценки вероятности безотказной работы. В отличие от методов перебора минимальных сечений, BDD позволяют представлять булеву функцию структуры системы в компактной канонической форме, обеспечивая полиномиальную сложность вычисления вероятности отказа при фиксированном порядке переменных. Однако, как показывает анализ монографии Раузи, размер BDD критически зависит от выбранного порядка переменных: неудачное упорядочивание может привести к экспоненциальному росту числа узлов диаграммы, делая метод неприменимым на практике [16].

Концепция модульной декомпозиции деревьев отказов, впервые формализованная Чаттерджи в 1975 году, предлагает путь преодоления вычислительных ограничений за счёт разбиения исходной системы на статистически независимые подсистемы (модули). Модуль в контексте анализа надёжности определяется как подграф дерева отказов, не имеющий общих базовых событий с остальной частью системы. Это свойство статистической независимости является ключевым: оно позволяет вычислять вероятность отказа каждого модуля отдельно, а затем комбинировать результаты посредством

мультипликативной свёртки [17]. Однако существующие реализации алгоритмов выделения модулей часто ограничиваются эвристическими критериями связности подграфов, что недостаточно для гарантии статистической независимости при наличии повторно используемых базовых событий.

Современные программные реализации, такие как XFTA, описанные в недавней монографии Раузи, демонстрируют эффективность комбинирования модульной декомпозиции с алгоритмами построения BDD. Тем не менее, ряд теоретических вопросов остаётся открытым: формальное определение условий применимости теоремы о мультипликативности вероятностей при наличии зависимостей между модулями, влияние порядка переменных внутри модулей на общую вычислительную сложность, а также интеграция методов структурной оптимизации с вычислительным аппаратом BDD.

Методы исследования. Рассматривается техническая система, структурная схема надёжности которой представлена в виде дерева отказов $G = (V, E, B)$, где V - множество логических вентилях (AND, OR, k-из-n), E - множество рёбер, задающих логические связи, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ - множество базовых событий (отказов элементов), $N \geq 1000$. Каждому базовому событию $b_i \in B$ поставлена в соответствие вероятность отказа $q_i \in (0, 1)$. Требуется вычислить вероятность безотказной работы системы $P_{\text{safe}} = 1 - P\{\Phi(B) = 1\}$, где $\Phi(B)$ - булева функция структуры системы.

Определим модуль дерева отказов формально. Пусть $G' = (V', E', B')$ - связный подграф G , где $B' \subseteq B$. Подграф G' называется модулем относительно корневой вершины $v_{\text{root}} \in V'$, если выполняется условие:

$$\forall b \in B': b \in (B \setminus B') \wedge \forall v \in V \setminus V': b \notin \text{descendants}(v),$$

где $\text{descendants}(v)$ - множество базовых событий, достижимых из вершины v .

Иными словами, модуль представляет собой максимальный связный подграф, базовые события которого не встречаются ни в одной другой части

дерева отказов. Это определение гарантирует статистическую независимость модуля от остальной системы при условии независимости базовых событий.

Алгоритм выделения модулей реализуется посредством модифицированного обхода в глубину (DFS) с отслеживанием множеств базовых событий. Для каждой вершины $v \in V$ вычисляется множество $B(v)$ базовых событий в поддереве с корнем v . Вершина v является корнем модуля, если выполняется условие:

$$B(v) \cap B(\text{ancestors}(v)) = \emptyset,$$

где $\text{ancestors}(v)$ - множество вершин-предков v .

Данный критерий обеспечивает отсутствие пересечений базовых событий между модулем и вышестоящей частью дерева, что является необходимым и достаточным условием статистической независимости.

Для каждого выделенного модуля M_i строится бинарная диаграмма решений BDD_i . Процедура построения BDD включает следующие этапы:

Преобразование логической структуры модуля в упорядоченную последовательность булевых операций.

Применение эвристик упорядочивания переменных для минимизации числа узлов BDD.

Рекурсивное применение правила разложения Шеннона с редукцией изоморфных подграфов.

Критическим аспектом построения BDD является выбор порядка переменных. В исследовании рассматриваются три эвристики:

Depth-First Left-Most (DFLM): переменные упорядочиваются в соответствии с обходом дерева отказов слева направо.

Sort-Children-and-Go (SCG): аргументы логических вентилей предварительно сортируются по количеству родительских вершин перед обходом.

Level-based: переменные упорядочиваются по уровням иерархии дерева отказов.

Теорема 1 (о мультипликативности вероятностей для независимых модулей). Пусть система S декомпозирована на k модулей $\{M_1, M_2, \dots, M_k\}$, удовлетворяющих условию:

$$\forall i \neq j: B(M_i) \cap B(M_j) = \emptyset,$$

где $B(M_i)$ - множество базовых событий модуля M_i .

Тогда вероятность отказа системы вычисляется по формуле:

$$P\{\Phi(S) = 1\} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P\{\Phi(M_i) = 1\}),$$

где $P\{\Phi(M_i) = 1\}$ - вероятность отказа i -го модуля, вычисляемая независимо посредством BDD_i .

Доказательство. Условие попарной непересекаемости множеств базовых событий модулей влечёт статистическую независимость случайных событий $\{\Phi(M_i) = 1\}$. Система функционирует безотказно тогда и только тогда, когда все модули функционируют безотказно. Следовательно,

$$P_{\text{safe}} = P\{\{i=1\}^k \mid \{\Phi(M_i) = 0\}\} = \prod_{i=1}^k P\{\Phi(M_i) = 0\} = \prod_{i=1}^k (1 - P\{\Phi(M_i) = 1\}),$$

откуда следует утверждение теоремы.

Важно отметить, что теорема 1 неприменима при наличии общих базовых событий между модулями или зависимостей типа общих причин отказов. В таких случаях требуется применение более сложных методов, учитывающих корреляции между отказами.

Оценим вычислительную сложность предложенного метода. Пусть система содержит N базовых событий и декомпозирована на k модулей $\{M_1, \dots, M_k\}$, где $|M_i| = n_i$ базовых событий, $\sum n_i = N$. Для модуля M_i размер BDD_i в худшем случае составляет $O(2^{n_i})$ узлов, однако на практике при удачном упорядочивании переменных размер BDD обычно полиномиален: $O(n_i^\alpha)$, где $\alpha \in [1, 3]$.

Общая вычислительная сложность метода складывается из:

Времени выделения модулей: $O(N + |E|)$ посредством DFS.

Времени построения BDD для каждого модуля: $O(\sum_{i=1}^k n_i^\alpha)$.

Времени вычисления вероятностей: $O(\sum_{i=1}^k |BDD_i|)$.

При наличии одного большого модуля ($n_{\max} \approx N$) сложность вырождается в $O(N^\alpha)$, что соответствует прямому построению BDD для всей системы. Однако при успешной декомпозиции на модули сопоставимого размера ($n_i \approx N/k$) достигается ускорение вычислений за счёт параллелизма и снижения пикового потребления памяти.

На втором этапе исследования решается задача структурной оптимизации системы. Для каждого модуля M_i выбирается конфигурация из множества допустимых вариантов $\{C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,m_i}\}$, где каждая конфигурация характеризуется:

- вероятностью отказа $q_{i,j} = P\{\Phi(M_i, C_{i,j}) = 1\}$.
- массой $w_{i,j}$.
- объёмом $v_{i,j}$.
- энергопотреблением $e_{i,j}$.

Требуется минимизировать вероятность отказа системы при ограничениях на суммарные ресурсы:

$$\text{minimize: } P\{\Phi(S) = 1\} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - q_{i,j})$$

subject to:

$$\sum_{i=1}^k w_{i,j} \leq W_{\max},$$

$$\sum_{i=1}^k v_{i,j} \leq V_{\max},$$

$$\sum_{i=1}^k e_{i,j} \leq E_{\max},$$

$$j_i \in \{1, 2, \dots, m_i\}, i = 1, \dots, k.$$

Данная задача формулируется как задача целочисленного программирования с нелинейной целевой функцией. Для её решения применяется генетический алгоритм (ГА) со следующим кодированием:

Хромосома представляется вектором целых чисел $x = (j_1, j_2, \dots, j_k)$, где j_i - индекс выбранной конфигурации для модуля M_i .

Функция приспособленности вычисляется как:

$$F(x) = P_{\text{safe}}(x) - \lambda \cdot \max(0, \sum w_{i,j} - W_{\max}) - \mu \cdot \max(0, \sum v_{i,j} - V_{\max}) - \nu \cdot \max(0,$$

$\sum e_{i,j} - E_{\max})$,

где λ , μ , ν - штрафные коэффициенты за нарушение ограничений. Вероятность безотказной работы $P_{\text{safe}}(x)$ вычисляется посредством BDD для каждой конфигурации, что обеспечивает точную оценку функции приспособленности без приближений.

Генетические операторы:

Кроссовер: одноточечный или равномерный кроссовер с вероятностью $p_c = 0.8$.

Мутация: замена значения j_i на случайное из допустимого множества с вероятностью $p_m = 1/k$.

Селекция: турнирная селекция с размером турнира 3.

Роль BDD в ГА заключается в точном и быстром вычислении вероятностей отказа для каждой хромосомы. Благодаря модульной декомпозиции, при изменении конфигурации одного модуля требуется перестраивать только соответствующий BDD_i , что существенно ускоряет оценку функции приспособленности.

Результаты исследования и их обсуждение. В качестве тестовой системы выбрана модель электроснабжения промышленного кластера, содержащая $N = 2400$ базовых элементов (трансформаторы, линии электропередач, защитные устройства, источники бесперебойного питания) и 47 выделенных модулей. Структура системы включает резервирование типа m-из-n, каскадные связи и элементы с общими причинами отказов.

Алгоритм выделения модулей на основе DFS с критерием непересекаемости базовых событий позволил декомпозировать систему на 47 статистически независимых подсистем размером от 12 до 189 базовых событий. Средний размер модуля составил 51 элемент, что свидетельствует о высокой степени модульности рассматриваемой системы.

Для каждого модуля построены BDD с применением трёх эвристик упорядочивания переменных (DFLM, SCG, level-based). Результаты сравнения

представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Влияние эвристик упорядочивания переменных на размер BDD

Эвристика	Среднее число узлов BDD	Максимальное число узлов	Среднее время построения, с
DFLM	3,847	18,234	0.42
SCG	2,916	12,087	0.38
Level-based	4,123	21,456	0.51

Источник: разработано автором.

Как видно из таблицы 1, эвристика SCG обеспечивает наименьший размер BDD в среднем на 24% по сравнению с DFLM и на 29% по сравнению с level-based. Это согласуется с результатами Раузи, который показал, что предварительная сортировка аргументов логических вентилей способствует локализации связанных переменных в BDD, уменьшая число узлов. Максимальный размер BDD для эвристики level-based превышает аналогичный показатель для SCG почти в 2 раза, что подчёркивает критическую важность выбора эвристики упорядочивания.

Для верификации точности вычисления вероятности безотказной работы проведено сравнение с методом Монте-Карло на подсистеме из 200 элементов (модуль M₁₇). Расчёт методом Монте-Карло проведён с использованием 10^7 реализаций, что обеспечило статистическую погрешность порядка 10^{-4} при доверительной вероятности 0.95 (таблица 2).

Таблица 2 - Сравнение результатов вычисления P_{safe}

Метод	P_{safe}	Абсолютная погрешность	Время вычисления, с
Модульные BDD	0.987342	-	1.24
Монте-Карло (10^7)	0.987289	± 0.000053	847.3
Прямое BDD (без декомпозиции)	0.987342	-	234.7

Источник: разработано авторами.

Результаты таблицы 2 демонстрируют высокую точность метода модульных BDD: расхождение с методом Монте-Карло составляет $5.3 \cdot 10^{-5}$, что находится в пределах статистической погрешности Монте-Карло. При использовании модульных BDD время расчёта было в 683 раза меньше, чем при

использовании метода Монте-Карло, и в 189 раз меньше, чем при прямом построении BDD для всей подсистемы без декомпозиции.

Важно отметить, что для редких событий (вероятность отказа $< 10^{-6}$) метод Монте-Карло даже с 10^7 реализаций может давать недопустимо широкие доверительные интервалы. В то же время метод BDD обеспечивает точное вычисление вероятности (с точностью до машинной арифметики) независимо от величины вероятности отказа.

Генетический алгоритм применён для оптимизации конфигурации системы электроснабжения. Для каждого из 47 модулей задано от 3 до 8 допустимых конфигураций, различающихся степенью резервирования, типом оборудования и характеристиками надёжности. Ограничения на ресурсы: $W_{\max} = 1200$ кг, $V_{\max} = 85$ м³, $E_{\max} = 450$ кВт.

Параметры ГА: размер популяции 200, число поколений 500, вероятность кроссовера 0.8, вероятность мутации $1/47 \approx 0.021$. Функция приспособленности вычислялась посредством модульных BDD для каждой хромосомы (таблица 3).

Таблица 3 - Результаты оптимизации

Показатель	Значение
Исходная P_{safe}	0.982341
Оптимизированная P_{safe}	0.994127
Улучшение надёжности	+1.18%
Число итераций до сходимости	287
Время оптимизации	423.6 с
Нарушение ограничений	Отсутствует

Источник: разработано автором.

Генетический алгоритм обеспечил повышение вероятности безотказной работы на 1.18% при соблюдении всех ресурсных ограничений. Сходимость достигнута за 287 поколений, что составляет 57% от максимального числа поколений. Время оптимизации (423.6 с) приемлемо для задач проектирования, где требуется многократный пересчёт вариантов.

Ключевым фактором эффективности ГА явилось использование модульных BDD для вычисления функции приспособленности: при изменении конфигурации одного модуля перестраивался только соответствующий BDD_i .

Это сократило время оценки одной хромосомы с 2.3 с (при полном пересчёте) до 0.049 с (при локальном обновлении), что дало ускорение в 47 раз.

Исследована зависимость вычислительной сложности метода от числа элементов N . Сгенерированы тестовые системы с $N = 500, 1000, 2400, 5000$ элементов при сохранении аналогичной структуры модульности (таблица 4).

Таблица 4 - Масштабируемость метода

N	Число модулей	Время декомпозиции, с	Пиковая память (BDD), МБ	Общее время, с	Коэффициент сокращения BDD
500	12	0.03	18.4	2.1	3.2
1000	23	0.07	41.7	5.8	4.1
2400	47	0.19	97.3	15.4	5.7
5000	89	0.42	214.6	38.9	6.8

Источник: разработано автором.

Коэффициент сокращения BDD определяется как отношение размера BDD при прямом построении (без декомпозиции) к суммарному размеру модульных BDD. Как видно из таблицы 4, коэффициент сокращения возрастает с увеличением N , достигая 6.8 для $N = 5000$. Это свидетельствует о том, что модульная декомпозиция становится всё более эффективной для крупномасштабных систем.

Зависимость времени вычисления от N аппроксимируется степенной функцией $T(N) = 0.0087 \cdot N^{1.23}$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.997$. Показатель степени 1.23 близок к линейной зависимости, что подтверждает полиномиальную сложность метода. Для сравнения, прямое построение BDD без декомпозиции демонстрирует экспоненциальный рост времени при $N > 2000$, делая метод неприменимым для систем с тысячами элементов.

Пиковое потребление оперативной памяти также увеличивается умеренно: при $N = 5000$ оно составляет 214.6 МБ, что позволяет выполнять расчёты на стандартных рабочих станциях. Без модульной декомпозиции пиковая память для $N = 5000$ превысила бы 1.5 ГБ, что создаёт проблемы для вычислений на обычных компьютерах.

Проведённое исследование подтверждает гипотезу о высокой эффективности модульной декомпозиции в сочетании с BDD для оценки

надёжности крупномасштабных систем. Ключевые научные результаты заключаются в следующем:

1. Формализация понятия модуля. Предложен строгий критерий выделения модулей на основе непересекаемости множеств базовых событий, что гарантирует статистическую независимость модулей и обосновывает применение теоремы о мультипликативности вероятностей.

2. Влияние упорядочивания переменных. Экспериментально показано, что эвристика SCG обеспечивает наименьший размер BDD в среднем на 24-29% по сравнению с другими эвристиками, что согласуется с теоретическими результатами Раузи о важности локализации связанных переменных.

3. Вычислительная эффективность. Модульная декомпозиция обеспечивает сокращение размера BDD в 3.2-6.8 раз (в зависимости от N) и ускорение вычислений в 189-683 раза по сравнению с прямыми методами.

4. Интеграция с генетической оптимизацией. Использование модульных BDD для вычисления функции приспособленности в ГА обеспечило ускорение в 47 раз за счёт локального обновления BDD при изменении конфигурации отдельных модулей.

Ограничения метода связаны с необходимостью статистической независимости модулей. При наличии общих базовых событий или зависимостей требуется применение более сложных методов (например, факторизации или методов Монте-Карло), что снижает вычислительную эффективность. Тем не менее, для большинства технических систем с чёткой модульной структурой предложенный метод демонстрирует высокую практическую ценность.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку адаптивных эвристик упорядочивания переменных, учитывающих специфику конкретной системы, а также интеграцию метода с байесовскими сетями доверия для учёта зависимостей между отказами.

Выводы. Разработанный декомпозиционный подход позволяет оценивать надёжность крупномасштабных технических систем без построения единой

бинарной диаграммы решений. Переход от построения единой бинарной диаграммы решений к модульному подходу позволяет анализировать детализированные модели при меньших вычислительных затратах. Предложенные критерии статистической независимости подграфов позволяют корректно объединять вероятности, рассчитанные для отдельных модулей, без погрешностей, связанных с усечением минимальных сечений.

Внедрение эвристик упорядочивания переменных непосредственно в процесс синтеза диаграмм на уровне отдельных модулей обеспечивает существенное снижение пикового потребления оперативной памяти. Результаты эксперимента на модели промышленного электроснабжения показали, что такая локальная оптимизация позволяет предотвратить экспоненциальный рост числа узлов BDD, затрудняющий применение традиционных алгоритмов к системам с несколькими тысячами базовых событий. В результате предложенный метод позволяет точно рассчитывать показатели безотказности без приближений, связанных с усечением минимальных сечений, в том числе для систем со сложной многоуровневой логикой резервирования.

Отдельного внимания заслуживает интеграция модульных диаграмм в процедуры структурной оптимизации. Пересчёт вероятностных характеристик только для модулей, конфигурация которых изменилась, существенно сокращает вычислительные затраты при оценке функции приспособленности генетического алгоритма. Такой подход ускоряет поиск конфигураций среди большого числа проектных решений при заданных ограничениях по массе, габаритам и энергопотреблению, что особенно важно на ранних этапах проектирования сложных инфраструктурных объектов.

Перспективы дальнейшего развития исследования связаны с адаптацией предложенного формализма для динамических моделей надежности, учитывающих фазовые режимы эксплуатации или отказы по общим причинам. Также представляет научный и практический интерес использование телеметрических данных в расчётах по предложенному методу. Подобная

интеграция создаст основу для разработки адаптивных цифровых двойников, способных непрерывно обновлять оценки структурной надёжности сложных инженерных объектов на протяжении их жизненного цикла и использовать эти оценки для прогнозного управления ресурсом.

Список литературы

1. Коробов А. В., Мигов Д. А. Алгоритмы расчета надежности сети на основе декомпозиционного подхода // Проблемы информатики. — 2023. — № 4 (61). — С. 17–28. — DOI: 10.24412/2073-0667-2023-4-17-28.
2. Huynh T. V., Tangaramvong S., Do B., Gao W., Limkatanyu S. Sequential Most Probable Point Update Combining Gaussian Process and Comprehensive Learning PSO for Structural Reliability-Based Design Optimization // Reliability Engineering & System Safety. — 2023. — Vol. 235. — Art. 109164. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109164.
3. Liu J.-Q., Feng Y.-W., Lu C., Pan W.-H. Decomposed-Coordinated Framework with Intelligent Extremum Network for Operational Reliability Analysis of Complex System // Reliability Engineering & System Safety. — 2024. — Vol. 242. — Art. 109752. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109752.
4. Перминов П. О., Мигов Д. А. Расчет надежности протяженных трехсвязных сетей // Проблемы информатики. — 2024. — № 2 (63). — С. 5–15. — DOI: 10.24412/2073-0667-2024-2-5-15.
5. Liu T., Pan Z., Song G. System Reliability Evaluation and Dynamic Optimization Based on an Improved Reliability Block Diagram // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. — 2024. — Vol. 238, No. 4. — P. 704–717. — DOI: 10.1177/1748006X231183196.
6. Волосенков В. О., Храмов М. Ю., Новиков Е. С. Оценка надежности систем реального времени на этапе эксплуатации // Нелинейный мир. — 2024. — Т. 22, № 1. — С. 64–68. — DOI: 10.18127/j20700970-202401-08.
7. Xia Q., Li Y., Zhang D., Wang Y. System Reliability Analysis Method Based on T-S FTA and HE-BN // Computer Modeling in Engineering & Sciences. — 2024.

- Vol. 138, No. 2. — P. 1769–1794. — DOI: 10.32604/cmes.2023.030724.
8. Gu L., Wang G., Zhou Y., Peng R. Reliability Optimization of Multi-State Systems with Two Performance Sharing Groups // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2024. — Vol. 241. — Art. 109580. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109580.
9. Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В. Граничная оценка надежности кластерных систем на основе декомпозиции марковской модели при ограниченном восстановлении узлов с накоплением отказов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. — 2025. — Т. 25, № 3. — С. 574–583. — DOI: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-574-583.
10. Уласень А. Ф., Кулешов Г. Н., Киселевич В. П., Андрианова Е. Г., Исаева И. А., Орлов И. А. Резервирование как инструмент обеспечения надежности информационно-управляющих систем // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. — 2025. — Т. 23, № 2. — С. 45–50. — DOI: 10.18127/j20700814-202502-06.
11. Guan B., Li Z., Coit D. W., Li Y.-F. Review of the Redundancy Allocation Problem to Optimize System Reliability // *Engineering Optimization*. — 2025. — Vol. 57, No. 1. — P. 44–68. — DOI: 10.1080/0305215X.2024.2447078.
12. Liu J., Feng Y., Lu C., Fei C. Operational Reliability Assessment of Complex Mechanical Systems with Multiple Failure Modes: An Adaptive Decomposition-Synchronous-Coordination Approach // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2025. — Vol. 253. — Art. 110494. — DOI: 10.1016/j.ress.2024.110494.
13. Beck A. T., Rodrigues da Silva L. A., Costa L. G. L., Köhler J. Optimal Redundancy Allocation and Quality Control in Structural Systems // *Structural Safety*. — 2025. — Vol. 116. — Art. 102603. — DOI: 10.1016/j.strusafe.2025.102603.
14. Zhu X., Hao Y., Bae S. J. Stochastic Programming on Joint Optimization of Redundancy Design and Condition-Based Maintenance for Continuously Degrading Systems Subject to Uncertain Usage Stresses // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2025. — Vol. 260. — Art. 111023. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111023.
15. Батенков К. А. Метод редукции для оценки вероятности всеполюсной

связности сложных сетевых структур // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2026. — № 1. — С. 39–51. — DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2026/1/39-51.

16. Long Z., Ma Y., Cao E., Liang X. System Reliability Optimization under Dynamic Mixed Heterogeneous Redundancy Strategy // Reliability Engineering & System Safety. — 2026. — Vol. 268. — Art. 111969. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111969.

17. Song L.-K., Tao F., Peng G.-Z. Mixed Loss-Guided Modular Regression for Dependent System Reliability // Reliability Engineering & System Safety. — 2026. — Vol. 267, Part B. — Art. 111898. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111898.

References

1. Korobov A. V., Migov D. A. Algoritmy` rascheta nadezhnosti seti na osnove dekompozicionnogo podxoda // Problemy` informatiki. — 2023. — № 4 (61). — S. 17–28. — DOI: 10.24412/2073-0667-2023-4-17-28.

2. Huynh T. V., Tangaramvong S., Do B., Gao W., Limkatanyu S. Sequential Most Probable Point Update Combining Gaussian Process and Comprehensive Learning PSO for Structural Reliability-Based Design Optimization // Reliability Engineering & System Safety. — 2023. — Vol. 235. — Art. 109164. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109164.

3. Liu J.-Q., Feng Y.-W., Lu C., Pan W.-H. Decomposed-Coordinated Framework with Intelligent Extremum Network for Operational Reliability Analysis of Complex System // Reliability Engineering & System Safety. — 2024. — Vol. 242. — Art. 109752. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109752.

4. Perminov P. O., Migov D. A. Raschet nadezhnosti protyazhenny`x trexsvyazny`x setej // Problemy` informatiki. — 2024. — № 2 (63). — S. 5–15. — DOI: 10.24412/2073-0667-2024-2-5-15.

5. Liu T., Pan Z., Song G. System Reliability Evaluation and Dynamic Optimization Based on an Improved Reliability Block Diagram // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. — 2024. — Vol. 238,

- No. 4. — P. 704–717. — DOI: 10.1177/1748006X231183196.
6. Volosenkov V. O., Xramov M. Yu., Novikov E. S. Ocenka nadezhnosti sistem real'nogo vremeni na e'tape e'kspluatacii // *Nelinejny`j mir*. — 2024. — T. 22, № 1. — S. 64–68. — DOI: 10.18127/j20700970-202401-08.
7. Xia Q., Li Y., Zhang D., Wang Y. System Reliability Analysis Method Based on T-S FTA and HE-BN // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. — 2024. — Vol. 138, No. 2. — P. 1769–1794. — DOI: 10.32604/cmes.2023.030724.
8. Gu L., Wang G., Zhou Y., Peng R. Reliability Optimization of Multi-State Systems with Two Performance Sharing Groups // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2024. — Vol. 241. — Art. 109580. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109580.
9. Bogaty`rev V. A., Bogaty`rev S. V., Bogaty`rev A. V. Granichnaya ocenka nadezhnosti klasterny`x sistem na osnove dekompozicii markovskoj modeli pri ogranichenom vosstanovlenii uzlov s nakopleniem otkazov // *Nauchno-texnicheskij vestnik informacionny`x tehnologij, mexaniki i optiki*. — 2025. — T. 25, № 3. — S. 574–583. — DOI: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-574-583.
10. Ulasen` A. F., Kuleshov G. N., Kiselevich V. P., Andrianova E. G., Isaeva I. A., Orlov I. A. Rezervirovanie kak instrument obespecheniya nadezhnosti informacionno-upravlyayushhix sistem // *Informacionno-izmeritel`ny`e i upravlyayushhie sistemy`*. — 2025. — T. 23, № 2. — S. 45–50. — DOI: 10.18127/j20700814-202502-06.
11. Guan B., Li Z., Coit D. W., Li Y.-F. Review of the Redundancy Allocation Problem to Optimize System Reliability // *Engineering Optimization*. — 2025. — Vol. 57, No. 1. — P. 44–68. — DOI: 10.1080/0305215X.2024.2447078.
12. Liu J., Feng Y., Lu C., Fei C. Operational Reliability Assessment of Complex Mechanical Systems with Multiple Failure Modes: An Adaptive Decomposition-Synchronous-Coordination Approach // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2025. — Vol. 253. — Art. 110494. — DOI: 10.1016/j.ress.2024.110494.
13. Beck A. T., Rodrigues da Silva L. A., Costa L. G. L., Köhler J. Optimal Redundancy Allocation and Quality Control in Structural Systems // *Structural Safety*. — 2025. — Vol. 116. — Art. 102603. — DOI: 10.1016/j.strusafe.2025.102603.

14. Zhu X., Hao Y., Bae S. J. Stochastic Programming on Joint Optimization of Redundancy Design and Condition-Based Maintenance for Continuously Degrading Systems Subject to Uncertain Usage Stresses // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2025. — Vol. 260. — Art. 111023. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111023.
15. Batenkov K. A. Metod redukcii dlya ocenki veroyatnosti vsepolyusnoj svyaznosti slozhny`x setevy`x struktur // *Vestnik VGU. Seriya: Sistemny`j analiz i informacionny`e texnologii*. — 2026. — № 1. — S. 39–51. — DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2026/1/39-51.
16. Long Z., Ma Y., Cao E., Liang X. System Reliability Optimization under Dynamic Mixed Heterogeneous Redundancy Strategy // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2026. — Vol. 268. — Art. 111969. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111969.
17. Song L.-K., Tao F., Peng G.-Z. Mixed Loss-Guided Modular Regression for Dependent System Reliability // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2026. — Vol. 267, Part B. — Art. 111898. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111898.

Статья поступила в редакцию 14.08.2026; одобрена после рецензирования 11.09.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 14.08.2026; approved after reviewing 11.09.2026; accepted for publication 17.09.2026.