

Анализ надежности двухполюсных сетей связи на основе метода приведения (редукции)

К. А. Батенков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

✉ pustur@yandex.ru

Аннотация

Введение. Методы оценки надежности сетей связи требуют простых и эффективных инструментов расчета. Метод приведения (редукции) позволяет упростить анализ сложных систем, но его применение ограничено определенными условиями.

Цель работы. Исследован метод редукции, основанный на последовательном преобразовании сетей с последовательными и параллельными соединениями в эквивалентные схемы. Рассмотрен один из типов связности – двухполюсная, предусматривающая наличие пути между двумя выделенными узлами, в отличие от многополюсной, оценивающей связность между несколькими критическими узлами, и всеполюсной, требующей наличия путей между всеми узлами сети.

Материалы и методы. Рассмотрены чисто последовательные и чисто параллельные структуры, а также их комбинации. Для последовательных систем вероятность работоспособности определяется как произведение вероятностей исправности элементов, для параллельных – через вероятность отказа всех компонентов.

Результаты. Для смешанных структур предложен алгоритм редукции, позволяющий вычислять их надежность по упрощенным формулам. Продемонстрировано, что процедура редукции и итоговые формулы для расчета надежности сети напрямую выводятся из правил для последовательных и параллельных соединений. На примере сети связи показано, что метод дает точные результаты при условии независимости отказов элементов.

Заключение. Метод редукции эффективен для анализа надежности сетей связи с последовательно-параллельными структурами. Точность расчетов существенно зависит от предположения о независимости отказов. Его преимущества – простота и наглядность, но он неприменим при учете постепенных отказов и взаимозависимости элементов. Кроме того, данный метод корректно обрабатывает только нагруженное резервирование, а для анализа систем с ненагруженным или облегченным резервированием требуются модификации метода. Отмечается наличие вычислительных сложностей для больших сетей и потеря информации о критичности элементов, поскольку в процессе упрощения теряются данные о вкладе отдельных компонентов в общую надежность системы, что затрудняет анализ слабых звеньев. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации сетей связи, а также для оценки их эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: надежность сетей, метод редукции, последовательные соединения, параллельные соединения, вероятностный анализ, расчет надежности

Для цитирования: Батенков К. А. Анализ надежности двухполюсных сетей связи на основе метода приведения (редукции) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 6. С. 56–70.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-56-70

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; принята к публикации после рецензирования 11.09.2025; опубликована онлайн 29.12.2025

Two-Terminal Reliability Analysis of Telecommunication Networks Based on Reduction Method

Kirill A. Batenkov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

✉ pustur@yandex.ru

Abstract

Introduction. Methods for assessing the reliability of communication networks require simple and effective calculation tools. Although reduction methods allow the analysis of complex systems to be simplified, their application is limited by certain conditions.

Aim. To investigate a reduction method based on the sequential transformation of networks with serial and parallel connections into equivalent circuits. Bipolar connectivity that implies a path between two dedicated nodes is considered, in contrast to multipolar connectivity that evaluates connectivity between several critical nodes and all-pole connectivity that requires paths between all nodes of the network.

Materials and methods. Purely sequential and purely parallel structures, as well as their combinations, are considered. For sequential systems, the probability of operability is defined as the product of the serviceability probabilities of the elements, for parallel systems – through the probability of failure of all components.

Results. For mixed structures, a reduction algorithm for calculating their reliability using simplified formulas is proposed. The reduction procedure and the final formulas for calculating network reliability are directly derived from the rules for serial and parallel connections. A communication network was used as an example to confirm the method accuracy provided that the failures of the elements are independent.

Conclusion. The demonstrated reduction method is effective for analyzing the reliability of communication networks with series-parallel structures. The accuracy of calculations depends significantly on the assumption of the independence of failures. The advantages of the method include its simplicity and clarity; however, the method is inapplicable in cases of gradual failures and the interdependence of elements. In addition, this method processes correctly only loaded redundancy; for systems with unloaded or lightweight redundancy, the method needs to be modified. Computational difficulties for large-size networks and the possibility of information loss about the criticality of elements is noted. This is related to the loss of data on the contribution of individual components to the overall reliability of the system in the process of simplification, which impedes the analysis of weak links. The results obtained can be used in the design and optimization of communication networks, as well as for assessing their operational reliability.

Keywords: network reliability, reduction method, serial connections, parallel connections, probabilistic analysis, reliability calculation

For citation: Batenkov K. A. Two-Terminal Reliability Analysis of Telecommunication Networks Based on Reduction Method. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 6, pp. 56–70. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-56-70

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 29.04.2025; accepted 11.09.2025; published online 29.12.2025

Введение. Анализ надежности сетей связи является важной задачей в инженерной практике. Один из распространенных методов оценки надежности – метод приведения (редукции), который позволяет упрощать сложные системы, сводя их к эквивалентным схемам. В статье рассматриваются основные принципы, преимущества и ограничения этого метода, а также применение для анализа последовательных,

параллельных и смешанных структур.

Анализ надежности сетей связи остается актуальной задачей в условиях роста сложности телекоммуникационных инфраструктур. Особую значимость приобретают методы, позволяющие эффективно оценивать связность сетей при различных сценариях отказов элементов. В настоящее время для этих целей широко применяется метод редукции, основанный на по-

следовательном упрощении структуры сети. Однако его использование сопряжено с рядом ограничений, требующих детального изучения.

Цель данной статьи – систематизация ограничений метода редукции при оценке надежности сетей связи и разработка рекомендаций по его применению. Основные задачи исследования включают: анализ известных модификаций метода, выявление границ его применимости для различных топологий сетей, оценку влияния допущения о независимости отказов на точность расчетов.

Теоретическая значимость исследования заключается в уточнении условий корректного применения метода редукции. Практическая ценность состоит в разработке рекомендаций по выбору методов анализа надежности в зависимости от типа сетевой конфигурации.

В современном технологическом ландшафте требование высокой надежности перешло из разряда желательных характеристик в категорию безусловных императивов для целого класса критически важных систем. Особую актуальность этот вопрос приобретает в таких областях, как оборонные и военные системы (системы управления вооружением, критическая инфраструктура национальной безопасности, разведывательные и наблюдательные комплексы) [1], авиационно-космическая отрасль (системы управления воздушным движением, бортовые авиационные комплексы, космические аппараты и спутниковые системы) [2], финансово-банковский сектор (платежные системы и процессинговые центры, системы биржевых торгов, инфраструктура цифровых валют) [3].

Надежность в различных телекоммуникационных сетях. Современные исследования [4–7] показывают, что последствия отказов в таких системах носят катастрофический характер: прямые человеческие жертвы (в авиации и военной сфере), огромные финансовые потери (в банковском секторе), геополитические кризисы (в системах национальной безопасности), долгосрочные экологические последствия (в атомной энергетике).

При этом, как отмечают эксперты [8–10], современные системы сталкиваются с беспрецедентными вызовами: экспоненциальный рост сложности архитектур, увеличение количества точек отказа в распределенных системах, появле-

ние новых классов угроз (киберфизические атаки), необходимость работы в экстремальных условиях.

Таким образом, проблема обеспечения надежности трансформировалась из чисто технической задачи в комплексную междисциплинарную проблему, требующую интеграции достижений компьютерных наук, математического моделирования, когнитивной психологии и кибербезопасности.

Современные телекоммуникационные и инфраструктурные сети предъявляют принципиально разные требования к надежности в зависимости от области применения и возможных последствий отказов.

Проводные сети составляют основу корпоративной и телекоммуникационной инфраструктуры, требуя исключительной надежности за счет избыточных соединений и сложных механизмов коррекции ошибок [11]. Эти системы обычно ориентированы на доступность уровня "пять девяток" (99.999 %), что означает всего несколько минут простоя в год. Основные проблемы связаны с уязвимостью физического уровня – повреждение кабелей, отказы разъемов и неисправность оборудования, что требует мгновенного обнаружения сбоев и перенаправления трафика.

Беспроводные сенсорные сети представляют принципиально иную парадигму, где энергоэффективность часто важнее абсолютной надежности [12]. Эти сети, используемые в системах экологического мониторинга и промышленного интернета вещей, делают акцент на самовосстановлении и устойчивости к периодическим разрывам соединения. Проблемы усугубляются динамически изменяющейся топологией, затуханием сигнала и жесткими ограничениями по энергопотреблению.

Мобильные сети, такие как 5G/6G, выдвигают требования сверхнадежной связи с малой задержкой [13, 14]. Для поддержки критически важных сервисов – от автономного транспорта до экстренных служб – эти сети должны обеспечивать бесперебойную связь, несмотря на мобильность абонентов и дефицит частотного спектра.

Типы надежности сетей (связности). В научной литературе проблема оценки сетевой надежности систематически рассматривается через призму количества учитываемых терминальных узлов [15–17]. Так, ключевые исследования

выделяют следующую классификацию: двух-терминальная (двухполюсная), все терминальная (всеполусная) и k -терминальная (многополюсная) надежность (связность) [18].

Первые фундаментальные работы по двух-терминальной надежности появились в 1950-х годах [19], заложив математический аппарат для анализа связности пар узлов, который позволил систематизировать основные подходы к расчету этого показателя, доказав его полиномиальную вычислительную сложность для большинства практических случаев [18, 20].

Проведенные исследования [21] выявили принципиально более высокую вычислительную сложность все терминального случая, отнеся его к классу NP-полных задач. В исследованиях последнего десятилетия особое внимание уделяется развитию вероятностных методов [22, 23], применению редукционных техник [24], разработке эффективных приближенных алгоритмов [25], а также использованию статистических методов [26].

Как показано в [27, 28], данный случай представляет наибольшую методологическую сложность. Современные исследования [29] сосредоточены на оптимизации алгоритмов факторизации, развитии эвристических подходов и применении методов машинного обучения.

Основные ограничения. Современные исследования в области оценки надежности сетевых структур выявляют как устойчивые преимущества метода редукции, так и существенные ограничения его применения.

Метод редукции, основанный на последовательном упрощении сетевой структуры путем замены групп элементов эквивалентными компонентами, доказал свою исключительную эффективность для последовательно-параллельных конфигураций. Данный подход обеспечивает точные результаты при анализе каскадных цепочек в энергосистемах, древовидных телекоммуникационных структур и других систем с четко выраженной иерархией [30]. Особую ценность метод демонстрирует при оценке надежности сетей с дублированными линиями [28], где позволяет существенно сократить вычислительную сложность задачи.

Однако современные исследования [31, 32] выявляют серьезные ограничения метода.

Главным препятствием становится его неприменимость к сетям со сложной топологией – мостовым, кольцевым и тем более к произвольным структурам. Уже для случая k -терминальной надежности при $k > 2$ задача становится вычислительно неразрешимой (NP-полной) в рамках классического подхода. Дополнительные сложности возникают при необходимости учета коррелированных отказов, временных факторов (износ, восстановление) и киберфизических взаимодействий.

Перспективные направления развития метода, обсуждаемые в современных работах [2–4, 33–35] включают несколько стратегий. Наиболее продуктивной представляется разработка гибридных подходов, сочетающих классическую редукцию с методами Монте-Карло для сложных топологий, машинным обучением для предиктивной аналитики и квантовыми алгоритмами для задач высокой размерности. Особое внимание уделяется интеграции с теорией временных графов, позволяющей учитывать динамические изменения сетевой структуры.

Для последовательно-параллельных сетей метод редукции сохраняет свою актуальность как базовый инструмент анализа. Современные оптимизации [29] предлагают автоматизацию процесса редукции через алгебраические преобразования, кеширование промежуточных результатов и параллельные вычисления. Существуют успешные модификации метода для частично последовательно-параллельных и многоуровневых иерархических структур [36].

Ключевыми нерешенными проблемами остаются: разработка универсальных критериев применимости метода, учет небинарных состояний элементов и адаптация к новым сетевым парадигмам (6G, квантовые сети). В качестве практических рекомендаций предлагается использовать редукцию как основной метод для последовательно-параллельных конфигураций, дополняя его вероятностными границами для оценки точности, а для сложных топологий – применять гибридные схемы анализа.

Таким образом, метод редукции, несмотря на свои ограничения, остается важным инструментом в арсенале специалистов по надежности. Его дальнейшее развитие через интеграцию с современными вычислительными подходами

открывает новые возможности для создания адекватных методов оценки надежности сложных сетевых инфраструктур будущего.

Оценка надежности последовательных структур. Последовательной называется такая система, отказ любого элемента которой приводит к отказу системы в целом. Последовательная сеть, состоящая из $n + 1$ абсолютно надежных узлов и n ненадежных линий связи, описывается при помощи графа G , диаграмма которого представлена на рис. 1.

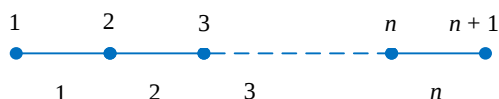


Рис. 1. Граф последовательной сети связи
 Fig. 1. Serial communication network graph

Работоспособность любой двухполюсной сети связи в каждом ее состоянии характеризуется наличием хотя бы одного пути, т. е. цепочки линий связи, соединяющих исток и сток сети, отображенной в виде графа G . Для последовательной двухполюсной сети подобный путь является единственным.

Событие связности такой сети определяется как пересечение событий связности каждого из ребер, составляющих ее граф. Если учесть, что каждая линия связи выходит из строя независимо от других, то вероятность связности сети p_G определяется как произведение вероятностей связности p_i каждого из ребер:

$$p_G = \prod_{i=1}^n p_i. \quad (1)$$

Для наглядности физической сущности данной формулы целесообразно рассмотреть

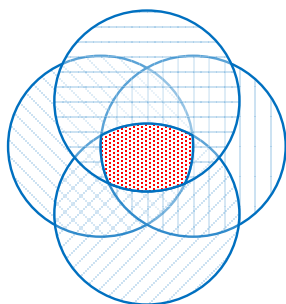


Рис. 2. Диаграмма Венна последовательной сети связи с четырьмя линиями связи

Fig. 2. Venn diagram of a serial communication network with four communication lines

диаграмму Венна (рис. 2), на которой кругами обозначены события связности четырех ребер последовательной сети, а красным цветом отмечено событие, соответствующее их пересечению, т. е. работоспособности последовательной сети с четырьмя линиями связи.

Формула (1) демонстрирует следующие простые свойства последовательной сети связи:

- с увеличением числа элементов последовательной сети ее надежность при прочих равных условиях понижается;
- надежность последовательной сети в целом всегда хуже, чем надежность любой из ее линий (в том числе и наихудшей).

В случае равенства всех вероятностей связности линий связи $p = p_i$ вероятность связности p_G последовательного графа G имеет степенной вид:

$$p_G = p^n. \quad (2)$$

Оценка надежности параллельных структур. Параллельной называется система, которая сохраняет свою работоспособность до тех пор, пока работоспособен хотя бы один ее элемент. Предполагается, что все элементы находятся во включенном состоянии с самого начала.

В инженерной практике такой резерв называют нагруженным или горячим. Параллельная сеть связи, состоящая из 2 абсолютно надежных узлов и n ненадежных линий связи, описывается при помощи мультиграфа G , диаграмма которого представлена на рис. 3.

В каждый момент времени функции двухполюсной сети связи выполняются основной линией связи, а в случае ее отказа происходит мгновенное переключение на использование

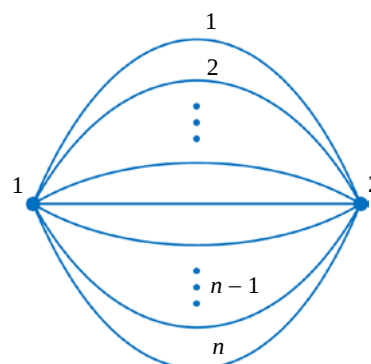


Рис. 3. Мультиграф параллельной сети связи

Fig. 3. Parallel communication network multigraph

любой из исправных к данному моменту линий связи. Таким образом, работоспособность любой двухполюсной сети связи в каждом ее состоянии характеризуется также наличием хотя бы одного пути, т. е. в данном случае, по крайней мере, одной линии связи, соединяющей исток и сток сети, отображенной в виде мультиграфа G . Для параллельной двухполюсной сети таких путей оказывается столько же, сколько и ребер между истоком и стоком.

Событие связности такой сети определяется как объединение событий связности каждого из ребер, составляющих ее мультиграф. Если учесть, что каждая линия связи выходит из строя независимо от других, то вероятность связности сети p_G определяется как разность между единицей и произведением вероятностей несвязности $q_i = 1 - p_i$ каждого из ребер:

$$p_G = 1 - \prod_{i=1}^n q_i. \quad (3)$$

Для наглядности физической сущности данной формулы целесообразно рассмотреть диаграмму Венна (рис. 4), на которой кругами обозначены события связности четырех ребер последовательной сети, а красным цветом отмечено событие, соответствующее их объединению, т. е. работоспособности параллельной сети с четырьмя линиями связи.

Формула (3) демонстрирует следующие простые свойства параллельной сети связи:

- с увеличением числа линий параллельной сети связи ее надежность при прочих равных условиях повышается;
- надежность сети в целом всегда выше, чем надежность любой из ее линий связи (в том числе и наилучшей).

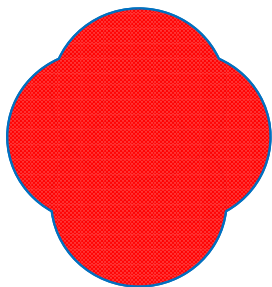


Рис. 4. Диаграмма Венна параллельной сети связи с четырьмя линиями связи

Fig. 4. Venn diagram of a parallel communication network with four communication lines

В случае равенства всех вероятностей связности линий связи $p = p_i$, а соответственно, и несвязности $q = q_i$ вероятность связности p_G параллельного графа G имеет степенной вид:

$$p_G = 1 - q^n. \quad (4)$$

Оценка надежности последовательно-параллельных структур. Сети связи с чисто последовательной или чисто параллельной структурой встречаются на практике довольно редко. Чаще приходится иметь дело со смешанными структурами: с параллельно-последовательными сетями (параллельное соединение последовательных линий связи) и с последовательно-параллельными системами (последовательное соединение параллельных линий связи), представленными на рис. 5, а также их комбинациями.

Подобные сети редуцируются до более простых структур, т. е. являются приводимыми. Процедура редукции базируется на предположении о возможности представления последовательного или параллельного подграфа в виде единственного ребра с вероятностью связности, вычисляемой согласно (1) или (3) соответственно. Наглядно редукцию можно представить в виде рис. 6, на котором отображено последовательное преобразование каждой последовательной цепочки ребер сети сначала в набор параллельно соединенных ребер, а затем полученного параллельного мультиграфа в конечное ребро.

На основе данного подхода для параллельно-последовательной структуры, представленной на рис. 5, а, вероятность связности записывается как

$$p_G = 1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \prod_{j=1}^{n_i} p_{i,j} \right),$$

где n_i – число элементов в i -й группе последовательно соединенных элементов; $p_{i,j}$ – вероятность связности j -го ребра в i -й группе последовательно соединенных линий связи.

При равенстве всех вероятностей связности $p = p_{i,j}$ и одинаковом числе линий в каждой группе $n' = n_i$ вероятность связности графа

$$p_G = 1 - (1 - p^{n'})^n.$$

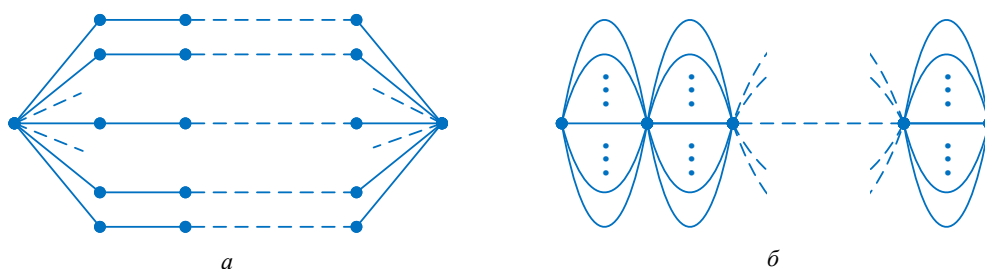


Рис. 5. Сеть связи: а – параллельно-последовательная; б – последовательно-параллельная

Fig. 5. Communication networks: а – parallel-serial; б – serial-parallel

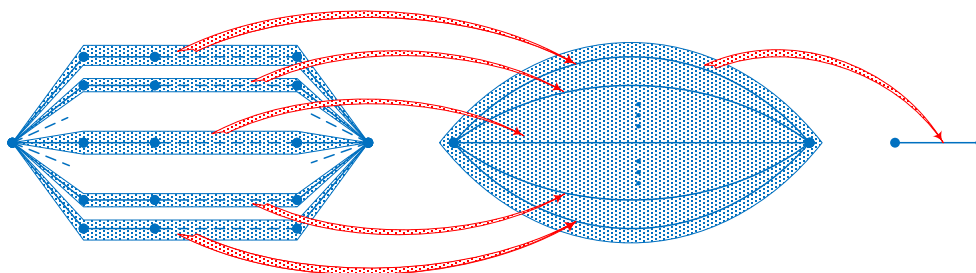


Рис. 6. Процедура редукции параллельно-последовательной сети связи

Fig. 6. Procedure for reducing a parallel-serial communication network

Для последовательно-параллельной структуры (рис. 5, б)

$$p_G = \prod_{i=1}^n \left(1 - \prod_{j=1}^{n_i} q_{i,j} \right), \quad (5)$$

где n_i – число элементов в i -й группе параллельно соединенных элементов; $q_{i,j} = 1 - p_{i,j}$ – вероятность несвязности j -го ребра в i -й группе параллельно соединенных линий связи.

При равенстве всех вероятностей связности $p = p_{i,j}$ и одинаковом числе линий в каждой группе $n' = n_i$ вероятность связности графа

$$p_G = (1 - q^{n'})^n.$$

В общем случае сети связи имеют гораздо более сложные смешанные структуры. Однако очень часто их вполне возможно привести к простейшим последовательно-параллельным или параллельно-последовательным структурам и на основе соотношений найти вероятности связности исходной сети связи.

Пример расчета надежности. Граф исследуемой сети связи приведен на рис. 7. Все узлы сети являются абсолютно надежными, а вероятность исправности любой линии связи равна 0.9. Определить надежность сети связи в направлении 1–7 методом редукции.

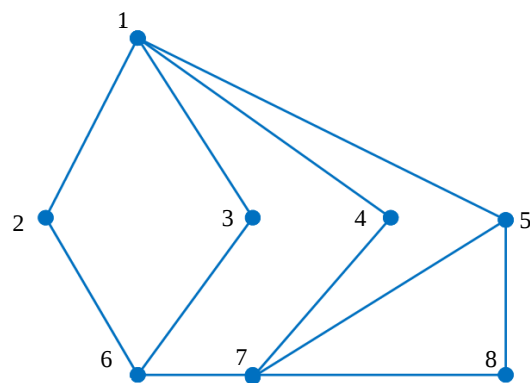


Рис. 7. Граф исследуемой сети связи

Fig. 7. Graph of the studied communication network

Дано: G , $p = 0.9$.

Найти: p_{1-7} .

На основе свойства изоморфизма графов для наглядности следует преобразовать диаграмму графа так, чтобы слева находился источник, а справа – сток (рис. 8, а).

Далее методом редукции необходимо привести граф к простейшему виду (далее справа от формулы приводится ссылка на рисунок, на котором красным цветом выделено эквивалентное ребро после проведенных упрощений):

$$p_{5-8-7} = p_{5,8} p_{7,8} = p^2; \quad (\text{рис. 8, б})$$

$$p_{5-7} = 1 - q_{5-8-7} q_{5,7} =$$

$$= 1 - q(1 - p^2); \quad (\text{рис. 8, в})$$

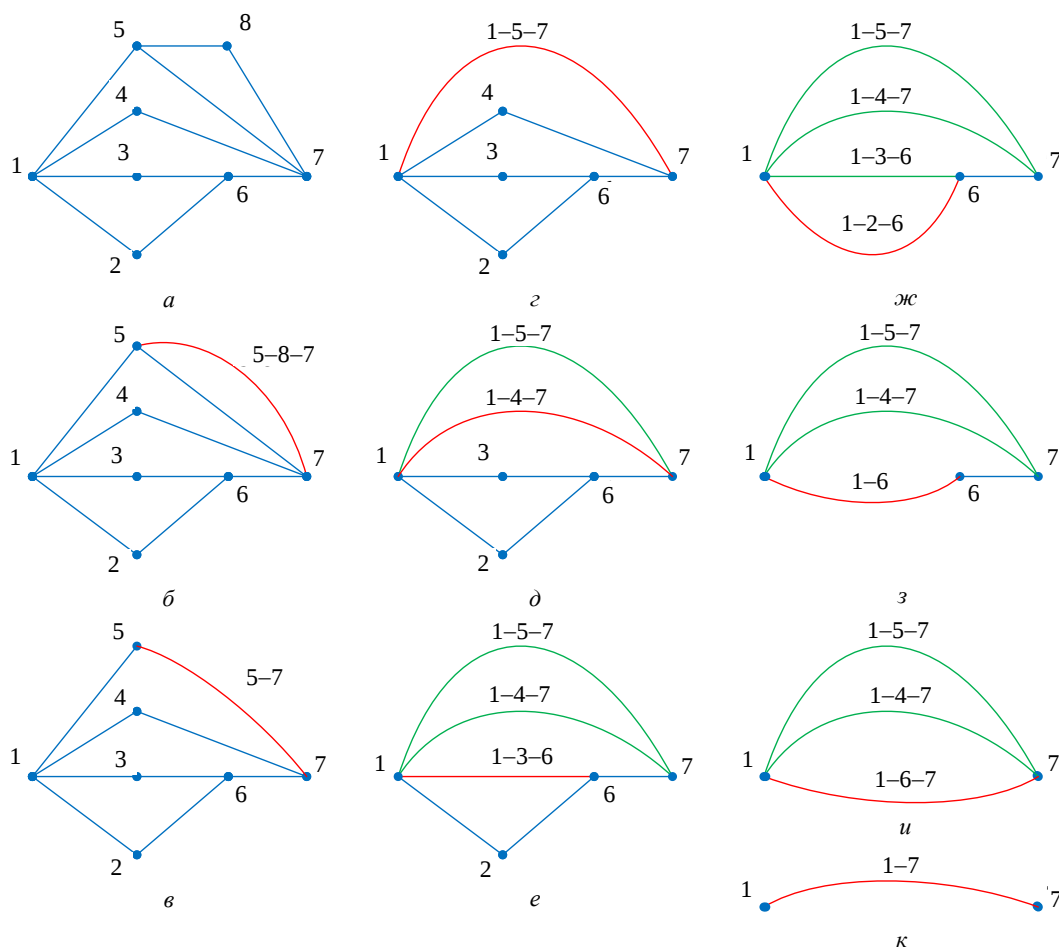


Рис. 8. Редукция графа исследуемой сети связи
Fig. 8. Reduction of the studied communication network graph

$$\begin{aligned}
 p_{1-5-7} &= p_{1,5} p_{5-7} = \\
 &= p[1 - q(1 - p^2)]; \quad (\text{рис. 8, } \varepsilon) \\
 p_{1-4-7} &= p_{1,4} p_{4,7} = p^2; \quad (\text{рис. 8, } \delta) \\
 p_{1-3-6} &= p_{1,3} p_{3,6} = p^2; \quad (\text{рис. 8, } e) \\
 p_{1-2-6} &= p_{1,2} p_{2,6} = p^2; \quad (\text{рис. 8, } \text{ж}) \\
 p_{1-6} &= 1 - q_{1-3-6} q_{1-2-6} = \\
 &= 1 - (1 - p^2)^2; \quad (\text{рис. 8, } \text{з}) \\
 p_{1-6-7} &= p_{1-6} p_{6,7} = \\
 &= p[1 - (1 - p^2)^2]; \quad (\text{рис. 8, } u) \\
 p_{1-7} &= 1 - q_{1-5-7} q_{1-4-7} q_{1-3-6} q_{1-2-6} = \\
 &= 1 - \left\{ 1 - p[1 - q(1 - p^2)] \right\} \times \\
 &\times (1 - p^2) \left\{ 1 - p[1 - (1 - p^2)^2] \right\} = \\
 &= 1 - 0.9[1 - 0.1(1 - 0.9^2)]0.9^2 \times \\
 &\times 0.9[1 - (1 - 0.9^2)^2] = 0.994. \quad (\text{рис. 8, } \kappa)
 \end{aligned}$$

Рекомендации по применению метода. Метод предназначен для расчета надежности смешанных сетей связи путем их последовательного упрощения (редукции).

Цель метода – вычисление итоговой вероятности связности между двумя конечными узлами сложной сети, которое выполняется на основе вероятностей связности отдельных ее элементов (ребер).

Область применения включает сети связи, которые могут быть приведены (редуцированы) к простейшим последовательным или параллельным структурам. В первую очередь это параллельно-последовательные и последовательно-параллельные сети, а также их комбинации.

Метод применяется итеративно в форме следующего алгоритма:

1) идентифицировать в структуре сети группу элементов, соединенных исключительно последовательно или исключительно параллельно;

2) вычислить эквивалентную вероятность связности для этой группы, используя соответствующее правило (последовательное или параллельное);

3) заменить найденную группу на новый, единственный условный элемент, надежность которого равна вычисленной эквивалентной вероятности;

4) повторять шаги 1–3 до тех пор, пока вся смешанная сеть не будет сведена к одному эквивалентному элементу: вероятность связности этого элемента и будет искомой вероятностью связности (надежностью) для всей сети.

Гибридные вычислительные модели. Классический метод редукции, разработанный в середине XX в., долгое время оставался основным инструментом оценки надежности сетевых структур. Однако цифровая трансформация телекоммуникационной отрасли, появление SDN/NFV, сетей 5G/6G и квантовых технологий связи требует кардинального пересмотра традиционных подходов. Современные исследования выделяют три ключевых направления модернизации метода: гибридные вычислительные модели, адаптация к новым сетевым архитектурам, оптимизация вычислительных процессов.

Наиболее продуктивным подходом стала разработка комбинированных алгоритмов, где классическая редукция дополняется методами Монте-Карло для сложных топологий, нейросетевыми моделями прогнозирования, а также квантовыми алгоритмами для задач высокой размерности.

Модели на основе метода Монте-Карло. В последние годы в научной литературе все большее внимание уделяется гибридным методам, сочетающим аналитические и стохастические подходы. Особый интерес представляет комбинация метода редукции и метода Монте-Карло, которая позволяет преодолеть ограничения каждого из методов при использовании их по отдельности [37].

Класс аналитических методов, не требующих процедур выборки, основан на строгих математических моделях и позволяет получать точные оценки надежности. Однако их применение связано с рядом существенных ограни-

чений, включающих требование бинарности состояний компонентов системы, предположение о статистической независимости элементов, допущение об абсолютной надежности узловых соединений или условие когерентности системы в целом. Эти ограничения существенно сужают область практического применения аналитических методов. Альтернативные подходы, такие как матричные методы оценки системной надежности, хотя и обладают большей гибкостью, демонстрируют ограниченную масштабируемость и применимы лишь для систем с умеренным количеством компонентов.

Методы, основанные на выборочных оценках, включая классическое моделирование Монте-Карло и его модификации, получили широкое распространение благодаря универсальности применения, неинтрузивности анализа (возможность использования сложных сетевых моделей как "черного ящика") и гибкости в учете различных факторов надежности. Однако точность стохастических методов существенно зависит от объема статистической выборки, специфики решаемой задачи и вычислительной сложности определения предельных состояний.

Для анализа редких событий (которые особенно важны при оценке надежности) традиционный метод Монте-Карло становится неэффективным. Это стимулировало развитие специализированных методов, таких как методы сокращения дисперсии, процедуры генерации состояний и метамоделирование с активным обучением.

Последние исследования демонстрируют значительный прогресс в области оценки надежности. Так, есть работы, позволяющие обобщить алгоритмы структурной надежности, описывающие разработку адаптивного метода, создание байесовской версии метода перекрестной энтропии, развитие комбинаторных подходов и методов последовательного интегрирования, разработку метода аппроксимации гамма-Бернулли.

Модели на основе нейросетей. Современные задачи анализа надежности сложных телекоммуникационных сетей требуют разработки эффективных методов, способных работать в условиях отсутствия явно заданной функции предельного состояния. Традиционные подходы, такие как метод Монте-Карло, часто оказываются слишком ресурсоемкими для практиче-

ского применения при анализе крупных систем. Поэтому применяют алгоритмы, объединяющие нейронные сети общего структурного типа и классические методы оценки надежности, которые используют локальное приближение функции предельного состояния при расчёте вероятности отказа [38].

Ключевыми особенностями подобных алгоритмов являются применение многослойной архитектуры, обобщенной структуры сети, где каждый новый слой формируется с учетом всех нейронов предыдущих слоев, гибридная оптимизация с использованием генетического алгоритма (для настройки структуры) и метода сингулярного разложения (для определения весовых коэффициентов).

Преимуществом подхода является универсальность (не требует явного задания функции предельного состояния, способен моделировать сложные нелинейные зависимости), точность (минимальная погрешность аппроксимации, возможность получения явного выражения предельного состояния) и эффективность (существенное сокращение вычислительных затрат, совместимость с классическими методами анализа надежности).

Проверка эффективности метода демонстрирует высокую точность оценок вероятности отказа, сокращение времени вычислений на 40–60 % по сравнению с прямым методом Монте-Карло и устойчивую работу с крупномасштабными моделями.

Модели на основе квантовых алгоритмов для задач высокой размерности. В [39] представлен квантовый алгоритм расчета надежности для неориентированных графов. Благодаря квантовой суперпозиции алгоритм позволяет одновременно рассматривать все возможные подграфы, проверять их связность и подсчитывать результаты.

Основными достоинствами алгоритма являются детерминированная приближенная корректность, независимость от уверенности в правильности расчета надежности, совместимость с произвольными мерами связности сети. Количество квантовых вентилей, необходимых для реализации алгоритма в рамках квантовой схемы, линейно относительно количества элементов графа, а требуемое количество кубитов

линейно относительно числа вершин.

Как отмечают авторы [39], алгоритм демонстрирует значительное полиномиальное ускорение по сравнению с лучшими известными классическими методами. Это достижение особенно важно для практических приложений в проектировании энергосистем, телекоммуникационных сетей и транспортных инфраструктур.

Квантовый алгоритм ориентирован на расчет надежности неориентированных графов. Естественные способы расширения, включающие ориентированные графы, приведут к росту уровня сложности, поскольку надежность не сможет быть описана как проблема достижимости стока с произвольно выбранным истоком. Вызывающим интерес оказывается вопрос ускорения алгоритма путем рассмотрения ребер в терминах матрицы смежности, что потребует переформулировки вопроса о достижимости как матричной задачи.

Авторы [38] отмечают, что внутрисхемные измерения уже поддерживаются или планируются к реализации на нескольких платформах квантовых компьютеров. Указанный подход использует внутрисхемные измерения для создания неунитарных операций, напоминающих классическую операцию ИЛИ. Специфическая схема реализации подобных операций позволяет оставить количество вспомогательных кубитов равным одному для всего оператора достижимости, не изменяя масштаб задачи, что демонстрирует важность неунитарных операций в использовании преимуществ квантовых компьютеров для решения широкого класса вычислительных задач.

Заключение. Эволюция метода редукции демонстрирует переход от «жестких» алгоритмических подходов к гибким адаптивным системам, сочетающим проверенные временем принципы упрощения структур, современные вычислительные технологии и междисциплинарные знания о природе отказов.

Классический метод редукции, разработанный в середине XX в., продолжает оставаться важным инструментом оценки надежности сетевых структур, однако цифровая трансформация и появление новых технологий (SDN/NFV, 5G/6G, квантовые коммуникации) требуют его существенной модернизации.

Анализ современных исследований показывает, что комбинированные методы превосхо-

дят классическую редукцию по нескольким ключевым параметрам: широкая область применения, высокая точность для сложных сетей, высокая вычислительная эффективность и полноценный учет современных технологий.

Наиболее перспективными направлениями интеграции с нейросетевыми технологиями являются использование многослойных архитектур с обобщенной структурой, гибридная оптимизация (генетические алгоритмы и сингулярное разложение), возможность работы без явного задания функции предельного состояния. Сочетание с квантовыми вычислениями позволяет проводить одновременный анализ всех возможных состояний сети, полиномиально ускорить вычисления и экономично использовать квантовые ресурсы. Подключение методов Монте-Карло повышает точность оценки редких событий, уменьшает дисперсии оценок, что делает возможным анализ сложных топологий.

Метод редукции сохраняет свою актуальность как базовый инструмент анализа, но требует существенной модернизации для соответствия современным требованиям. Наибольшую эффективность демонстрируют гибридные под-

ходы, сочетающие концептуальную простоту редукции, универсальность стохастических методов, адаптивность нейросетевых технологий и вычислительную мощь квантовых алгоритмов.

Для практического применения рекомендуется использовать классическую редукцию для простых подсистем, применять гибридные методы для анализа сложных компонентов, для глобальной оценки надежности крупных сетей рассматривать квантовые алгоритмы.

В качестве перспективных направлений исследований можно выделить разработку универсальных критериев применимости различных методов, создание стандартизированных процедур верификации и развитие специализированного программного обеспечения.

Таким образом, современный этап развития методов оценки надежности сетей характеризуется переходом от изолированного использования классических подходов к их интегрированному применению в рамках единых вычислительных платформ. Этот синтез методов открывает новые возможности для проектирования и эксплуатации сложных сетевых инфраструктур будущего.

Список литературы

1. Oszczypała M., Ziółkowski J., Małachowski J. Reliability Analysis of Military Vehicles Based on Censored Failures Data // Appl. Sci. 2022. Vol. 12, № 5. Art. № 2622. doi: 10.3390/app12052622
2. A Multi-Scale Attention Mechanism Based Domain Adversarial Neural Network Strategy for Bearing Fault Diagnosis / Q. Zhang, N. Tang, X. Fu, H. Peng, C. Bo, C. Wang // Actuators. 2023. Vol. 12, № 5. Art. № 188. doi: 10.3390/act12050188
3. The Effect of Network Delay and Contagion on Mobile Banking Users: A Dynamical Analysis / L. E. Donath, G. Mircea, M. Neamțu, G. G. Noja, N. Sirghi // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 22. Art. № 3493. doi: 10.3390/math12223493
4. Yan J., Sui Y., Dai T. A Particle Swarm Optimization-Based Ensemble Broad Learning System for Intelligent Fault Diagnosis in Safety-Critical Energy Systems with High-Dimensional Small Samples // Mathematics. 2025. Vol. 13, № 5. Art. № 797. doi: 10.3390/math13050797
5. FIVADMI: A Framework for In-Vehicle Anomaly Detection by Monitoring and Isolation / K. Mahbub, A. Nehme, M. Patwary, M. Lacoste, S. Allio // Future Internet. 2024. Vol. 16, № 8. Art. № 288. doi: 10.3390/fi16080288

6. Test Case Generation Method for Increasing Software Reliability in Safety-Critical Embedded Systems / B. Koo, J. Bae, S. Kim, K. Park, H. Kim // Electronics. 2020. Vol. 9, № 5. Art. № 797. doi: 10.3390/electronics9050797.
7. Xu W., Ma D. A Framework for Model and Verification of Safety-Critical Operating System Based on ARINC653 // Electronics. 2021. Vol. 10, № 16. Art. № 1934. doi: 10.3390/electronics10161934
8. Cyber Potential Metaphorical Map Method Based on GMap / D. Si, B. Jiang, Q. Xia, T. Li, X. Wang, J. Liu // ISPRS Int. J. of Geo-Information. 2025. Vol. 14, № 2. Art. № 46. doi: 10.3390/ijgi14020046
9. Research and Prospect of Defense for Integrated Energy Cyber-Physical Systems Against Deliberate Attacks / T. Zang, X. Tong, C. Li, Y. Gong, R. Su, B. Zhou // Energies. 2025. Vol. 18, № 6. Art. № 1479. doi: 10.3390/en18061479
10. Capacity Model and Constraints Analysis for Integrated Remote Wireless Sensor and Satellite Network in Emergency Scenarios / W. Zhang, G. Zhang, F. Dong, Z. Xie, D. Bian // Sensors. 2015. Vol. 15, № 11. P. 29036–29055. doi: 10.3390/s151129036

11. Comparison of wireless network over wired network and its type / Sh. Shikha, K. M. Meghana, C. R. Manjunath, N. Santosh // *Int. J. of Research – Granthaalayah. RACSIT-17*. 2017. Vol. 5, № 4. P. 14–20. doi: 10.5281/zenodo.572289
12. System Design and Reliability Improvement of Wireless Sensor Network in Plant Factory Scenario / W. Luo, Y. Zeng, X. Zheng, L. Zha, W. Cai, Q. Wang, J. Zhang // *Agronomy*. 2025. Vol. 15, № 3. Art. № 751. doi: 10.3390/agronomy15030751
13. Combining 5G New Radio, Wi-Fi, and LiFi for Industry 4.0: Performance Evaluation / J. Navarro-Ortiz, J. J. Ramos-Munoz, F. Delgado-Ferro, F. Canelas, D. Camps-Mur, A. Emami, H. Falaki // *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 18. Art. № 6022. doi: 10.3390/s24186022
14. Key Enabling Technologies for 6G: The Role of UAVs, Terahertz Communication, and Intelligent Reconfigurable Surfaces in Shaping the Future of Wireless Networks / W. M. Othman, A. A. Ateya, M. E. Nasr, A. Muthanna, M. ElAffendi, A. Koucheryavy, A. Hamdi // *J. of Sensor and Actuator Networks*. 2025. Vol. 14, № 2. Art. № 30. doi: 10.3390/jsan14020030
15. A literature review on network reliability analysis and its engineering applications / G. Vaibhav, P. Y. Om, S. Gunjan, P. S. R. Ajay // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers Part O J. of Risk and Reliability*. 2021. Vol. 235, № 1. P. 167–181. doi: 10.1177/1748006X20962258
16. Батенков А. А., Батенков К. А., Фокин А. Б. Методы формирования множеств состояний телекоммуникационных сетей для различных мер связности // *Тр. СПИИРАН*. 2020. Вып. 19, № 3. С. 644–673. doi: 10.15622/sp.2020.19.3.7
17. Shi H., Wang N., Liu Q. Calculation Method for Sortie Mission Reliability of Shipborne Unmanned Vehicle Group // *J. of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, № 8. Art. № 1309. doi: 10.3390/jmse12081309
18. Reliability and Availability Evaluation of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications / I. Silva, L. A. Guedes, P. Portugal, F. Vasques // *Sensors*. 2012. Vol. 12, № 1. P. 806–838. doi: 10.3390/s120100806
19. Liang J., Zhao H., Xie S. A Method for Calculating the Reliability of 2-Separable Networks and Its Applications // *Axioms*. 2024. Vol. 13, № 7. Art. № 459. doi: 10.3390/axioms13070459
20. Батенков А. А., Батенков К. А., Фокин А. Б. Анализ вероятности связности телекоммуникационной сети на основе матрицы независимых событий // *Автоматика и телемеханика*. 2023. № 11. С. 77–92. doi: 10.31857/S0005231023110053
21. Dong L., Zhao H., Lai H.-J. Local Optimality of Mixed Reliability for Several Classes of Networks with Fixed Sizes // *Axioms*. 2022. Vol. 11, № 3. Art. № 91. doi: 10.3390/axioms11030091
22. Reliability Analysis of Multi-Autonomous Underwater Vehicle Cooperative Systems Based on Fuzzy Control / Y. Hao, Y. Yao, Y. Zhang, F. Zuo // *Photonics*. 2025. Vol. 12, № 4. Art. № 333. doi: 10.3390/photonics12040333
23. Design and Reliability Analysis of a Novel Redundancy Topology Architecture / F. Li, W. Liu, W. Gao, Y. Liu, Y. Hu // *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 7. Art. № 2582. doi: 10.3390/s22072582
24. Батенков А. А., Батенков К. А., Фокин А. Б. Формирование сечений телекоммуникационных сетей для анализа их устойчивости с различными мерами связности // *Информатика и автоматизация*. 2021. Т. 2, вып. 20. С. 371–406. doi: 10.15622/ia.2021.20.2.5
25. Zarezadeh S., Ashrafi S., Asadi M. Network Reliability Modeling Based on a Geometric Counting Process // *Mathematics*. 2018. Vol. 6, № 10. Art. № 197. doi: 10.3390/math6100197
26. Статистическая модель оценки надежности систем неразрушающего контроля на основе решения обратных задач / А. Е. Александров, С. П. Борисов, Л. В. Бунина, С. С. Быковский, И. В. Степанова, А. П. Титов // *Российский технологический журн.* 2023. Т. 11, № 3. С. 56–69. doi: 10.32362/2500-316X-2023-11-3-56-69
27. Батенков К. А. Анализ и синтез структур сетей связи методом перебора состояний // *Вестн. СПбУ. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2022. Т. 18, № 3. С. 300–315. doi: 10.21638/11701/spbu10.2022.301
28. Kuo W., Wan R. Recent Advances in Optimal Reliability Allocation // *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. Pt. A. IEEE Trans.* 2007. Vol. 37, № 2. P. 143–156. doi: 10.1109/TSMCA.2006.889476
29. Payette M., Abdul-Nour G. Machine Learning Applications for Reliability Engineering: A Review // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 7. Art. № 6270. doi: 10.3390/su15076270
30. Misra K. B. Handbook of Performability Engineering. London: Springer Verlag, 2008. 1316 p. doi: 10.1007/978-1-84800-131-2
31. Konak A., Smith A. E. Network Reliability Optimization / Ed. by M. G. C. Resende, P. M. Pardalos. Handbook of Optimization in Telecommunications. Boston, MA: Springer, 2006. P. 735–760. doi: 10.1007/978-0-387-30165-5_26
32. Батенков К. А., Батенков А. А. Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости // *Тр. СПИИРАН*. 2018. № 58 (3). С. 128–159. doi: 10.15622/sp.58.6
33. Garg H., Ram M. Reliability Management and Engineering: Challenges and Future Trends (1st ed.). Boca Raton: CRC Press, 2020. 300 p. doi: 10.1201/9780429268922

34. Батенков К. А. Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний // Тр. СПИИРАН. 2019. № 5 (18). С. 1093–1118. doi: 10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118

35. Батенков К. А., Фокин А. Б. Анализ структурной надежности сетей связи с механизмами защитного переключения для одного защищаемого и одного резервного участков // Российский технологический журн. 2024. Т. 12, № 2. С. 39–47. doi: 10.32362/2500-316X-2024-12-2-39-47

36. Iglesias R., Pascual-Ortigosa P., Sáenz-de-Cabezón E. An Algebraic Version of the Sum-of-disjoint-products Method for Multi-state System Reliability Analysis // Proc. Int. Symp. Symbolic and Algebraic Computation (ISSAC '22), Villeneuve-d'Ascq,

France, 4–7 July 2022. Association for Computing Machinery, 2022. P. 509–516. doi: 10.1145/3476446.3535472

37. Adaptive Monte Carlo methods for estimating rare events in power grids / J. Chan, R. Paredes, I. Papaioannou, L. Duenas-Osorio, D. Straub // TechRxiv. 2024. P. 1–10. doi: 10.36227/techrxiv.170654653.30299222/v1

38. Beheshti Nezhad H., Miri M., Ghasemi M. R. New neural network-based response surface method for reliability analysis of structures // Neural Computing and Applications. 2019. Vol. 31. P. 777–791. doi: 10.1007/s00521-017-3109-2

39. Pabst S., Nam Y. A Quantum Algorithm for Network Reliability. URL: <https://arxiv.org/pdf/2203.10201> (дата обращения 29.04.2025)

Информация об авторе

Батенков Кирилл Александрович – доктор технических наук (2016), профессор (2023), профессор кафедры прикладной математики МИРЭА – Российского технологического университета. Автор 304 научных работ. Сфера научных интересов – оценка качества; сети связи; теория сигналов; теория телетрафика; графы. Адрес: МИРЭА – Российский технологический университет, пр. Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Россия E-mail: pustur@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

References

1. Oszczypała M., Ziolkowski J., Małachowski J. Reliability Analysis of Military Vehicles Based on Censored Failures Data. Appl. Sci. 2022, vol. 12, no. 5, art. no. 2622. doi: 10.3390/app12052622

2. Zhang Q., Tang N., Fu X., Peng H., Bo C., Wang C. A Multi-Scale Attention Mechanism Based Domain Adversarial Neural Network Strategy for Bearing Fault Diagnosis. Actuators. 2023, vol. 12, no. 5, art. no. 188. doi: 10.3390/act12050188

3. Donath L. E., Mircea G., Neamtu M., Noja G. G., Sirghi N. The Effect of Network Delay and Contagion on Mobile Banking Users: A Dynamical Analysis. Mathematics. 2024, vol. 12, no. 22, art. no. 3493. doi: 10.3390/math12223493

4. Yan J., Sui Y., Dai T. A Particle Swarm Optimization-Based Ensemble Broad Learning System for Intelligent Fault Diagnosis in Safety-Critical Energy Systems with High-Dimensional Small Samples. Mathematics. 2025, vol. 13, no. 5, art. no. 797. doi: 10.3390/math13050797

5. Mahbub K., Nehme A., Patwary M., Lacoste M., Allio S. FIVADMI: A Framework for In-Vehicle Anomaly Detection by Monitoring and Isolation. Future Internet. 2024, vol. 16, no. 8, art. no. 288. doi: 10.3390/fi16080288

6. Koo B., Bae J., Kim S., Park K., Kim H. Test Case Generation Method for Increasing Software Reliability in Safety-Critical Embedded Systems. Electronics. 2020, vol. 9, no. 5, art. no. 797. doi: 10.3390/electronics9050797

7. Xu W., Ma D. A Framework for Model and Verification of Safety-Critical Operating System Based on ARINC653. Electronics. 2021, vol. 10, no. 16, art. no. 1934. doi: 10.3390/electronics10161934

8. Si D., Jiang B., Xia Q., Li T., Wang X., Liu J. Cyber Potential Metaphorical Map Method Based on GMap. ISPRS Int. J. of Geo-Information. 2025, vol. 14, no. 2, art. no. 46. doi: 10.3390/ijgi14020046

9. Zang T., Tong X., Li C., Gong Y., Su R., Zhou B. Research and Prospect of Defense for Integrated Energy Cyber-Physical Systems Against Deliberate Attacks. Energies. 2025, vol. 18, no. 6, art. no. 1479. doi: 10.3390/en18061479

10. Zhang W., Zhang G., Dong F., Xie Z., Bian D. Capacity Model and Constraints Analysis for Integrated Remote Wireless Sensor and Satellite Network in Emergency Scenarios. Sensors. 2015, vol. 15, no. 11, pp. 29036–29055. doi: 10.3390/s151129036

11. Shikha Sh., Meghana K. M., Manjunath C. R., Santosh N. Comparison of Wireless Network Over Wired Network and Its Type. Int. J. of Research – Granthaalayah. RACSIT-17. 2017, vol. 5, no. 4, pp. 14–20. doi: 10.5281/zenodo.572289

12. Luo W., Zeng Y., Zheng X., Zha L., Cai W., Wang Q., Zhang J. System Design and Reliability Improvement of Wireless Sensor Network in Plant Factory Scenario. Agronomy. 2025, vol. 15, no. 3, art. no. 751. doi: 10.3390/agronomy15030751

13. Navarro-Ortiz J., Ramos-Munoz J. J., Delgado-Ferro F., Canellas F., Camps-Mur D., Emami A., Falaki H. Combining 5G New Radio, Wi-Fi, and LiFi for Industry 4.0: Performance Evaluation. *Sensors*. 2024, vol. 24, no. 18, art. no. 6022.
doi: 10.3390/s24186022
14. Othman W. M., Ateya A. A., Nasr M. E., Muthanna A., ElAffendi M., Koucheryavy A., Hamdi A. Key Enabling Technologies for 6G: The Role of UAVs, Terahertz Communication, and Intelligent Reconfigurable Surfaces in Shaping the Future of Wireless Networks. *J. of Sensor and Actuator Networks*. 2025, vol. 14, no. 2, art. no. 30.
doi: 10.3390/jsan14020030
15. Vaibhav G., Om P. Y., Gunjan S., Ajay P. S. R. A Literature Review on Network Reliability Analysis and Its Engineering Applications. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers Part O J. of Risk and Reliability*. 2021, vol. 235, no. 1, pp. 167–181.
doi: 10.1177/1748006X20962258
16. Batenkov A. A., Batenkov K. A., Fokin A. B. Digital Information Telecommunication Technologies. *Trudy SPIIRAN*. 2020, vol. 19, no. 3, pp. 644–673. (In Russ.)
doi: 10.15622/sp.2020.19.3.7
17. Shi H., Wang N., Liu Q. Calculation Method for Sortie Mission Reliability of Shipborne Unmanned Vehicle Group. *J. of Marine Science and Engineering*. 2024, vol. 12, no. 8, art. no. 1309.
doi: 10.3390/jmse12081309
18. Silva I., Guedes L. A., Portugal P., Vasques F. Reliability and Availability Evaluation of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications. *Sensors*. 2012, vol. 12, no. 1, pp. 806–838.
doi: 10.3390/s120100806
19. Liang J., Zhao H., Xie S. A Method for Calculating the Reliability of 2-Separable Networks and Its Applications. *Axioms*. 2024, vol. 13, no. 7, art. no. 459.
doi: 10.3390/axioms13070459
20. Batenkov A. A., Batenkov K. A., Fokin A. B. Telecommunication Network Connectivity Probability Analysis Based on Independent Events Matrix. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2023, no. 11, pp. 77–92. (In Russ.)
doi: 10.31857/S0005231023110053
21. Dong L., Zhao H., Lai H.-J. Local Optimality of Mixed Reliability for Several Classes of Networks with Fixed Sizes. *Axioms*. 2022, vol. 11, no. 3, art. no. 91.
doi: 10.3390/axioms11030091
22. Hao Y., Yao Y., Zhang Y., Zuo F. Reliability Analysis of Multi-Autonomous Underwater Vehicle Cooperative Systems Based on Fuzzy Control. *Photonics*. 2025, vol. 12, no. 4, art. no. 333.
doi: 10.3390/photonics12040333
23. Li F., Liu W., Gao W., Liu Y., Hu Y. Design and Reliability Analysis of a Novel Redundancy Topology Architecture. *Sensors*. 2022, vol. 22, no. 7, art. no. 2582.
doi: 10.3390/s22072582
24. Batenkov A. A., Batenkov K. A., Fokin A. B. Forming the Telecommunication Networks' Cross-Sections to Analyze the Latter Stability with Different Connectivity Measures. *Informatics and Automation*. 2021, vol. 2, iss. 20, pp. 371–406. (In Russ.)
doi: 10.15622/ia.2021.20.2.5
25. Zarezadeh S., Ashrafi S., Asadi M. Network Reliability Modeling Based on a Geometric Counting Process. *Mathematics*. 2018, vol. 6, no. 10, art. no. 197.
doi: 10.3390/math6100197
26. Alexandrov A. E., Borisov S. P., Bunina L. V., Bikovsky S. S., Stepanova I. V., Titov A. P. Statistical Model for Assessing the Reliability of Non-Destructive Testing Systems by Solving Inverse Problems. *Russ. Technological J.* 2023, vol. 11, no. 3, pp. 56–69. (In Russ.)
doi: 10.32362/2500-316X-2023-11-3-56-69
27. Batenkov K. A. Analysis and Synthesis of Communication Network Structures by State Enumeration Method. *Vestnik Sankt Peterburgskogo Universiteta. Seriya 10. Prikladnaya Matematika. Informatika. Protsessy Upravleniya*. 2022, vol. 18, no. 3, pp. 300–315. (In Russ.)
doi: 10.21638/11701/spbu10.2022.301
28. Kuo W., Wan R. Recent Advances in Optimal Reliability Allocation. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. Part A. IEEE Trans.* 2007, vol. 37, no. 2, pp. 143–156.
doi: 10.1109/TSMCA.2006.889476
29. Payette M., Abdul-Nour G. Machine Learning Applications for Reliability Engineering: A Review. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 7, art. no. 6270.
doi: 10.3390/su15076270
30. Misra K. B. Handbook of Performability Engineering. London, Springer Verlag, 2008, 1316 p.
doi: 10.1007/978-1-84800-131-2
31. Konak A., Smith A. E. Network Reliability Optimization. Ed. by M. G. C. Resende, P. M. Pardalos. *Handbook of Optimization in Telecommunications*. Boston, MA, Springer, 2006, pp. 735–760.
doi: 10.1007/978-0-387-30165-5_26
32. Batenkov K. A., Batenkov A. A. Analysis and Synthesis of Communication Network Structures According to the Determined Stability Indicators. *Trudy SPIIRAN*. 2018, no. 58 (3), pp. 128–159. (In Russ.)
doi: 10.15622/sp.58.6
33. Garg H., Ram M. Reliability Management and Engineering: Challenges and Future Trends (1st ed.). Boca Raton, CRC Press, 2020, 300 p.
doi: 10.1201/9780429268922
34. Batenkov K. A. Accurate and boundary Estimate of Communication Network Connectivity Probability Based on Model State Complete Enumeration Method. *Trudy SPIIRAN*. 2019, no. 5 (18), pp. 1093–1118. (In Russ.)
doi: 10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118
35. Batenkov K. A., Fokin A. B. Analysis of the Structural Reliability of Communication Networks Supporting Protective Switching Mechanisms for One Protected Section and One Backup Section. *Russ. Technological J.* 2024, vol. 12, no. 2, pp. 39–47. (In Russ.)
doi: 10.32362/2500-316X-2024-12-2-39-47

36. Iglesias R., Pascual-Ortigosa P., Sáenz-de-Cabezón E. An Algebraic Version of the Sum-of-disjoint-products Method for Multi-state System Reliability Analysis. Proc. Int. Symp. Symbolic and Algebraic Computation (ISSAC '22), Villeneuve-d'Ascq, France, 4–7 July 2022. Association for Computing Machinery, 2022, pp. 509–516.

doi: 10.1145/3476446.3535472

37. Chan J., Paredes R., Papaioannou I., Duenas-Osorio L., Straub D. Adaptive Monte Carlo Methods

for Estimating Rare Events in Power Grids. TechRxiv. 2024, pp. 1–10.

doi: 10.36227/techrxiv.170654653.30299222/v1

38. Beheshti Nezhad H., Miri M., Ghasemi M. R. New Neural Network-Based Response Surface Method for Reliability Analysis of Structures. Neural Computing and Applications. 2019, vol. 31, pp. 777–791.

doi: 10.1007/s00521-017-3109-2

39. Pabst S., Nam Y. A Quantum Algorithm for Network Reliability. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2203.10201> (accessed 29.04.2025)

Information about the author

Kirill A. Batenkov, Dr Sci. (Eng.) (2016), Professor (2023), Professor of the Department of Applied Mathematics of MIREA – Russian Technological University. The author of 304 scientific publications. Area of expertise: quality assessment; communication networks; signal theory; telegraphy theory; graphs.

Address: MIREA – Russian Technological University, 78, Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russia

E-mail: pustur@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6083-1242>
