

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ СВЯЗНОСТИ СЕТЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Якушенко С.А.¹, Шевяков В.Д.², Садовников В.Е.³, Гладких Д.С.⁴

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2-65-73

Ключевые слова: радиотехнические сети передачи информации, устойчивость сети, живучесть сети, сетевой граф, равновесное состояние, формула Бернулли, устойчивость сети.

Аннотация

Цель работы: на основе анализа и обобщения структурных свойств сетевых графов данных разработать методологический подход к оценке структурной связности интегрированных радиотехнических систем с вероятностным характером межузловых связей.

Метод исследования: метод исследования сочетает в себе комплексное сочетание модели Бернулли и имитационного моделирования на основе программной платформы MATLAB для вычисления вероятностей успешного соединения между узлами радиотехнической сети передачи информации. Этот подход позволяет учитывать фактор неопределенности и многоаспектность процессов при моделировании структурной связности. Важным аспектом является наличие равновесных вероятностей связи между всеми узлами сети, что позволяет применять вероятностную модель Бернулли для вычисления структурной связности вершин сетевого графа.

Результаты исследования: результаты позволяют оценивать структурную связность радиотехнических сетей в динамике изменения вероятностных межузловых связей, а также сформулировать научно обоснованные требования к структурным параметрам сети, таким как количество узлов, ветвей и межузловых связей для успешного функционирования сети в условиях воздействия внешних деструктивных факторов. Эти аспекты будут положены в основу дальнейшего развития алгоритмов и методов анализа и оценки свойств сетей связи военного назначения.

Научная новизна: впервые применена вероятностная модель Бернулли в сочетании с имитационным моделированием в программной среде MATLAB для количественной оценки и сравнительного анализа структурной связности радиотехнических сетей передачи информации, что позволяет осуществить моделирование различных ситуаций вероятностного характера, возникающих при деструктивных внешних воздействиях. В работе представлен формализованный подход к расчету структурной связности, учитывающий степень влияния и вклад структурных параметров в общую оценку устойчивости радиотехнических сетей.

Вклад: Якушенко С. А. – общая концепция предложенного подхода моделирования вероятностных ситуаций и расчета структурной связности; Шевяков В. Д. и Садовников В. Е. – программная реализация предложенного метода и проведение эксперимента; Гладких Д. С. Шевяков В. Д. – обсуждение особенностей реализации подхода.

Введение

В современном мире, где информационные технологии и средства связи играют первостепенную роль в тактике ведения военных действий, важность интегрированных радиотехнических систем, осуществляющих добычу, хранение, обработку и доведение информации до должностных лиц становится очевидной. Интеграция является критически важным фактором,

обеспечивающим оперативное реагирование на изменения обстановки и эффективное функционирование систем управления. Современные вооруженные конфликты характеризуются быстротой принятия решений и необходимостью мгновенного обмена информацией в условиях внешних деструктивных воздействий [1,2]. Поэтому важным свойством радиотехнических систем является устойчивость функционирования сети

¹Якушенко Сергей Алексеевич, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: was16@mail.ru

²Шевяков Владислав Денисович, младший научный сотрудник Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: Vlad89312239540.la@yandex.ru

³Садовников Владимир Евгеньевич, младший научный сотрудник Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: bladimir1998@mail.ru

⁴Гладких Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: mr.zid2004@mail.ru

и способность ее адаптации к изменяющимся условиям обстановки. Моделирование и оценка свойств устойчивости радиотехнических систем и его составляющих в условиях современного вооруженного противоборства является комплексной и многогранной задачей, требующей всестороннего анализа и глубокого понимания специфики современных военных конфликтов.

Современные сети связи представляют собой сложную систему, включающую оконечное оборудование, узлы связи (УС), коммутационные и информационные центры, линии связи, соединяющие между собой элементы сети и др. [3,4]. В настоящее время активно создаются и внедряются многоуровневые, иерархические сети связи различных ведомств. Кроме того, реализуется концепция создания единой инфокоммуникационной платформы. Следовательно, тенденции к интеграции систем и единению платформ с одной стороны усложняют радиотехнические сети передачи информации, а с другой требуют устойчивого их функционирования в условиях воздействия деструктивных факторов.

Для обоснования устойчивости функционирования проектируемых сетей применяется множество методов ее оценки. В основном оценка проводится на основе структур сетей, что позволяет использовать их результаты при разработке современных радиотехнических систем. Ключевой характеристикой таких сетей являются структурная связность, которая характеризует среднее количество связей между узлами сети [5,6]. Связность сети косвенно определяет ее живучесть, т.е. способность сети сохранять свою работоспособность при воздействии внешних деструктивных факторов.

В статье [7] рассматривается метод расчета структурной надежности сетей связи на основе данных мониторинга. В отличие от предыдущего примера, здесь предлагается алгоритм вычисления математического ожидания числа связей в сети, используя коэффициент готовности, интенсивность отказов и вероятность связности. Математические модели и программная реализация позволяют анализировать зависимость показателей надежности от различных параметров, таких как интенсивность отказов и простоя. Эти методы обеспечивают точную оценку надежности сети, но требуют значительных вычислительных ресурсов и сложных моделей для анализа.

Таким образом оценка структурной связности сложных радиотехнической систем является важным параметром живучести, а следовательно, устойчивости сети и в современных условиях создания и проектирования новых интегрированных радиотехнических систем является

актуальным направлением исследования. Поэтому **целью работы является** анализ структурных свойств сетевых графов и разработка научного подхода к оценке структурной связности интегрированных радиотехнических систем. Этому вопросу и посвящена данная статья.

Анализ предмета исследования и постановка задачи

Анализ существующих способов оценки структурной связности показывает, что она основана на определении среднего количества связей от узлов сети. Основным их недостатком является, то, что они не учитывают степень связи между узлами, т.е. насколько эти связи надежны и как изменяется структурная связность при изменении надежности связи между узлами сети.

Основополагающей частью работы является математическая модель оценки структурной связности сложных систем с неустойчивыми связями [8]. В данной статье предложена математическая модель оценки структурной связности сложных систем, которая учитывала влияние деструктивных факторов на надежность связей между элементами систем. Особенностью модели является учет вероятностного характера взаимосвязей.

В условиях воздействия деструктивных факторов на элементы радиотехнической сети надежность межузловых линий и узлов не является абсолютной: отказы могут происходить как из-за аппаратных сбоев, так и под воздействием внешних негативных факторов. Поэтому каждый компонент сети оценивается вероятностью его нормального (требуемого) функционирования. Физически это означает вероятность того, насколько стабильно данный компонент выполняет свои функции. Вероятностная мера надежности может выражаться как вероятность безотказной работы за определенный период времени или другими показателями имеющие иной физический смысл.

Использование равновесных вероятностей между узлами позволило применить модель Бернулли, что значительно упростило процесс вычислений и повысило оперативность оценки структурной связности. Это стало возможным благодаря тому, что наш подход позволяет рассчитывать вероятность успешной связи сети, где каждое соединение имеет равновесную вероятность успеха или неудачи. Формула Бернулли используется для вычисления вероятности успешного исхода в серии независимых испытаний (биномиальных экспериментов), где каждый исход имеет два возможных результата: успех или неудача [9]. Такой метод обеспечивает возмож-

ность отслеживания структурной связности в реальном времени и предоставляет более простой и эффективный инструмент для анализа сети. Поэтому в работе рассматривается обобщенное понятие структурной связности, как взаимосвязи между узлами коммутации, образующие полное и равновесное состояние структуры сети.

Такой подход расчета структурной связности обусловлен необходимостью оперативного восстановления линий связи в случае их разрушения на критических участках графа связующей системы, вызванного деструктивным воздействием извне или сбоями внутри архитектуры [10,11]. Данный способ позволяет не только вычислить структурную связность, т.е. живучесть сети, но и оценить устойчивость восстановленных линий связи и вероятность успешной передачи информационных пакетов. Кроме того, анализ структурной связности помогает выявлять уязвимости места сети, прогнозировать поведение системы при различных сценариях внешних воздействий и разрабатывать эффективные методы её модернизации [12,13]. Таким образом, модель является многофункциональной определяющей структурную связность, надежность, устойчивость и работоспособность сложных сетевых систем в зависимости от физического смысла показателя модели.

На платформе MATLAB был разработан программный код, который позволяет рассчитывать структурную связность сети для заданного числа узлов связи n и различных значений k , представляющих минимальное количество узлов, с которыми должна быть установлена связь. Программа также вычисляет среднее количество связей для всех узлов, которое меньше или больше определенного значения m . Итоговый результат представляет собой график зависимости структурной связности от параметров системы, что обеспечивает наглядность и удобство анализа.

Таким образом, в работе предложен научный подход к анализу структурной связности сетей связи с использованием модели Бернулли и имитационного моделирования в программной среде MATLAB. Этот подход позволяет упростить расчеты и повысить оперативность оценки структурной связности в условиях равновесных вероятностей между узлами сети.

В рамках данной работы анализируется вычисление структурной связности для полностью связной и равновесной сети. В таких условиях применима формула Бернулли, поскольку вероятности связи между узлами графа считаем равными, а каждый элемент системы связан с другими.

Формула Бернулли используется для вычисления вероятности успешного исхода в серии независимых испытаний (биномиальных экспериментов), где каждый исход имеет два возможных результата: успех или неудача⁵:

$$p(k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$$

где n — общее количество испытаний; k — количество успешных исходов в испытаниях; p — вероятность успеха (наличие связи) в каждом испытании; C_n^k — биномиальный коэффициент, определяющий число сочетаний связей между вершинами сетевого графа (из n возможных по k)

Биномиальный коэффициент можно вычислить по формуле:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

Представленная математическая модель (2) позволяет вычислить вероятность того, что из n независимых испытаний будет ровно k успешных исходов при вероятности успеха p в каждом испытании, т.е. определить число сочетаний связей от каждой вершины графа в отдельности. Для определения среднего значения связности сетевого будем использовать ее усредненное значение, тогда формализованную постановку задачи можно записать в следующем виде:

$$C_k(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k},$$

Ограничения и условия: $p = 0, \dots, 1, n > 0, 0 < k < n$.

Полученная математическая модель (3) позволяет вычислить усредненное значение связности если известна структура сетевого графа и вероятностные значения ребер графа.

Анализ структурной связности

Анализ структурной связности сетей связи основан на использовании модели Бернулли, что позволяет упростить расчеты в силу простоты модели, а следовательно, повысить оперативность оценки структурной связности в условиях равновесных вероятностей между узлами сети.

Основным предположением данного подхода является наличие равновесных вероятностей связи между всеми узлами сети [14,15]. Такое ограничение имеет преимущество в оценке структурной связности любой размерности сетевого графа, однако ограничивает рамки применимости модели, которые связаны с функционирова-

⁵Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь. 1983. 416 с.,

нием и назначением сети, а также видами деструктивных воздействий. В таких условиях структурная связность сети определяется как взаимосвязь между узлами коммутации, формирующая полносвязное и равновесное состояние структуры сети.

На платформе MATLAB был разработан программный код, который позволяет рассчитывать структурную связность сети для заданного числа узлов связи n и различных значений k , представляющих минимальное количество узлов, с которыми должна быть установлена связь. Программа также вычисляет среднее количество связей для всех узлов, которое меньше или больше определённого значения k . Итоговый результат представляет собой график зависимости структурной связности от параметров системы, что обеспечивает наглядность и удобство анализа.

Алгоритм расчета структурной связности сетевого графа интегрированной радиотехнической системы приведен на рис. 1. Он включает следующие процедуры:

1. Ввод параметров: запрос количества узлов n и минимальное количество узлов для связи k ;

запрос на ввод значений вероятностей ветвей графа p .

2. Расчет структурной связности. Для каждого значения p и каждого значения k вычисляется структурная связность C_k с использованием модели Бернулли. Далее определяются средние значения структурной связности для значений k меньших, равных и больших заданного значения k .

3. Визуализация результатов. Строится столбчатая диаграмма зависимости средней структурной связности от вероятности p для различных значений k . Затем линейный график зависимости структурной связности от k для различных значений p .

Для реализации вышеописанного алгоритма были написаны основные фрагменты кода на MATLAB. Этот алгоритм и код позволяют оперативно анализировать структурную связность сетей связи, используя простые и понятные методы вычислений. Полученные результаты предоставляют значимые данные для оценки структурной связности, позволяя учесть стохастическую природу сетевых процессов.

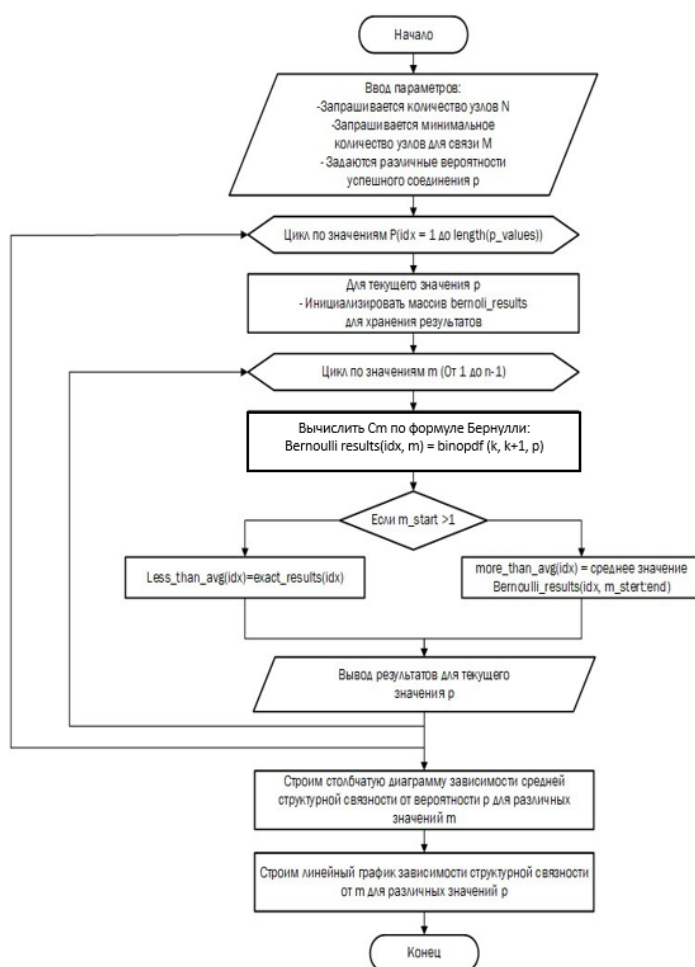


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы

Результаты исследований структурной связности радиотехнической сети с десятью узлами от количества межузловых связей и значений вероятности соединения узлов (вероятности ребер графа) приведены на рис. 2. Анализ полу-

ченных зависимостей показывает, что при вероятностном подходе к оценке показателя структурной связности фрагмента сетевого графа его нормированное значение уменьшается по сравнению с оценкой по классическим методикам.

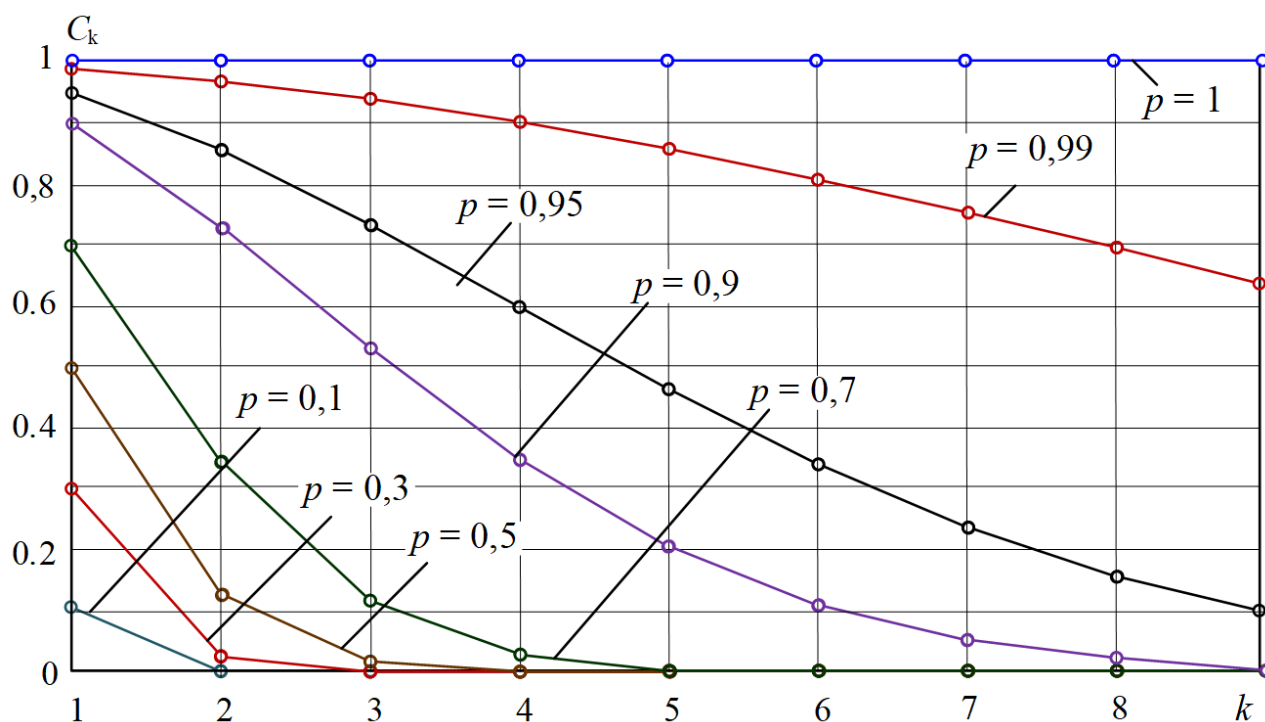


Рис. 2. График зависимости структурной связности от k для различных вероятностей

Анализ полученных зависимостей показывает, что при вероятностном подходе к оценке показателя структурной связности фрагмента сетевого графа его нормированное значение уменьшается по сравнению с оценкой по классическим методикам. Это связано с тем, что при наличии связи между узлами, вес связующего ребра не равен единице как в классическом подходе, а имеет вероятностный характер связи (меньше равен единице), так как отражает степень деструктивного воздействия на ребра сетевого графа, что отражает реальную действительность.

С уменьшением значения вероятности связи между узлами показатель структурной связности уменьшается, т.е. снижается устойчивость (живучесть) сети по причине деструктивных воздействий на ее элементы.

При увеличении количества узлов сети, но ограничении на число связей между ними (например, по причине уменьшения дальности связи или других факторов) даже при высокой вероятности связей показатель структурной связности значительно снижается.

Также необходимо отметить, что в полностью связной структуре сети из 10 узлов показатель связности уменьшился на 36% по сравнению с классической оценкой. Этот эффект связан с тем, что несмотря на практически полную вероятную связь в сложных сетях с увеличением числа узлов возрастает количество возможных пораженных путей. Поэтому даже небольшие отклонения в вероятностях ветвей оказывают существенное влияние на общую структурную связность. Этот результат доказывает тот факт, что чем сложнее структура сети, тем большая надежность должна быть у ее ребер.

Полученные результаты демонстрируют важность учета надежности отдельных связей в сложных системах. Анализ качества межузловых зависимостей позволит выявлять критически слабые места сети, оптимизировать ее структуру и на конечном этапе разрабатывать стратегии повышения живучести системы.

Вторая часть программы позволяет проводить анализ связности сети в зависимости от количества ветвей графа, превышающих или не-

достающих до требуемого (заданного) значения. Этот этап особенно важен для аналитической работы, так как позволяет не только определить точную вероятность связи узлов, но и рассчитать средние значения вероятностей для меньших и больших значений ветвей. Такая детализация

дает возможность формировать более точные и обоснованные выводы об архитектуре системы связи. Полученные диаграммы структурной связности сети (рис. 3.) предоставляют значимые данные для оценки структурной связности, учитывая стохастическую природу сетевых процессов.

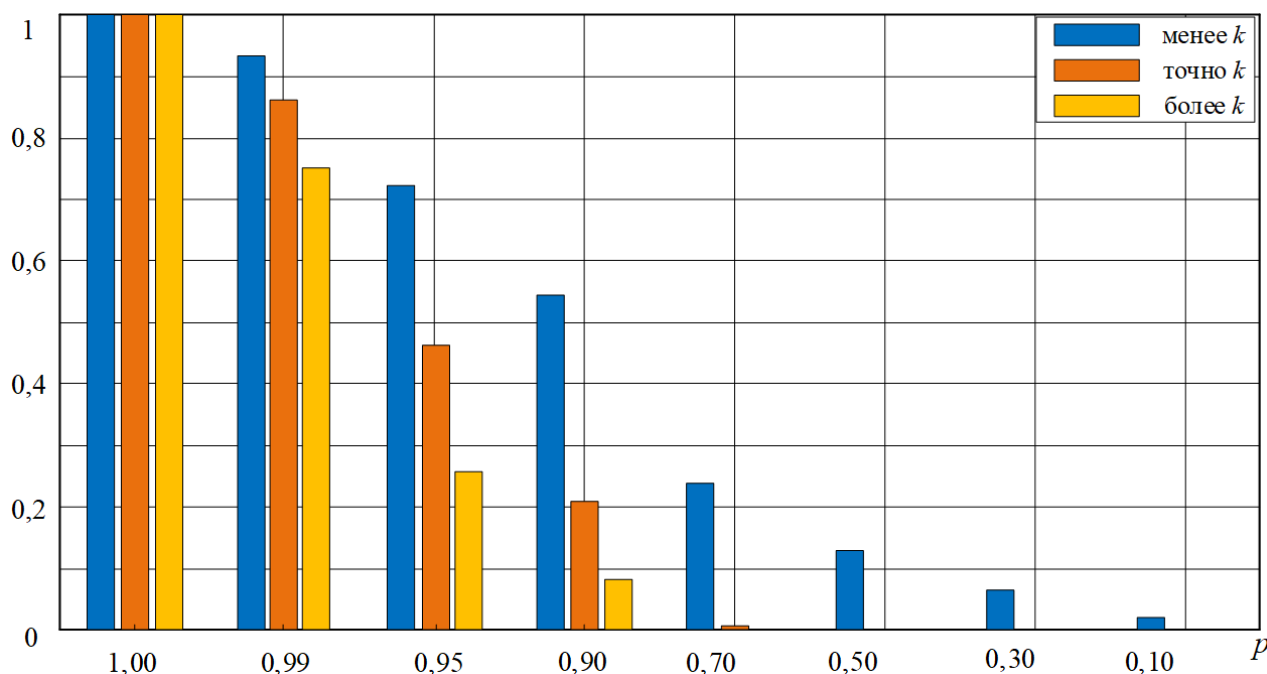


Рис. 3. Средняя структурная связность для менее, точно и более k

Анализ свидетельствует о том, что структурная связность не является фиксированным (детерминированным) значением, а представляет собой стохастический процесс, зависящий от множества факторов, таких как вероятность деструктивных воздействий, количество узлов и характер связей между ними. Для аналитической работы данная диаграмма более значимая, так как по ней определяется точная вероятность, а также средняя для меньших и больших значений. Это позволяет сделать более точное оценочное заключение по архитектуре системы связи и способствует глубокому пониманию поведения сложных сетей в различных условиях, что важно для проектирования устойчивых и эффективных структур систем связи.

Заключение

Разработанная математическая модель оценки и анализа структурной связности интегрированных радиотехнических систем с вероятностным характером межузловых связей отражает значительный потенциал для оценки устойчивости и работоспособности сетей в условиях де-

структивных воздействий. В рамках настоящего исследования был предложен методологический подход, основанный на использовании модели Бернулли, которая позволяет упростить расчеты и повысить оперативность оценки структурной связности при наличии равновесных вероятностей связи между узлами сети в условиях влияния деструктивных факторов.

Основной целью исследования являлось создание простой, но адекватной воздействиям модели оценки структурной связности и разработка программного обеспечения для ее расчета. Необходимо заметить, что предложенная методология оценки структурной связности сетевого графа позволяет оценить устойчивость сети в целом в рамках живучести к деструктивным воздействиям на элементы сети, но она не дает информации о других свойствах сети, например, таких как, своевременность доставки информации, коэффициенты исправного действия маршрута, направления связи и т.п. Очевидно, что в реальных условиях вероятности связи между узлами не могут быть одинаковыми из-за множества факторов, таких как различия в характеристиках

оборудования, разнообразия в внешних условиях и деструктивных воздействиях и другие. Однако, принятые допущение о равновесных вероятностях связи, позволили разработать базовый алгоритм и программную реализацию, которая служит фундаментом для дальнейших исследований и расширений.

Полученные результаты исследований могут быть положены в основу научного обоснования и сравнительного анализа структурной живучести радиотехнических сетей различной сложности, в том числе интегрированных, а также для проведения ситуационного анализа устойчивости сетей к деструктивным воздействиям и оперативной оценки деформации межузловых связей. Аналитическая работа с результатами оценки системных показателей сети позволит определять слабые звенья сети, задавать научно обоснованные требования к вероятностным показателям элементов сети и формулировать точные оценочное заключение по структурной

связности системы в различных условиях функционирования, что важно для проектирования устойчивых и эффективных структур систем связи.

Перспективами дальнейшего развития является совершенствование модели и программного обеспечения для оценки не только структурной, но и функциональной связности. Совершенствование модели может быть направлено на учет вероятностей разнородных ветвей связи, добавление поглощающих узлов связи и циклических узлов, что позволит учитывать более сложные сценарии функционирования сетей, такие как асимметричные ветви, динамические изменения топологии и задержки в узлах, а также обеспечит более точные прогнозы производительности и надежности сетей в реальных условиях эксплуатации. В целом такой подход будет иметь важное значение в условиях быстро меняющейся обстановки, технологий и содержания военных конфликтов.

Литература

1. Михайлов. Р.Л. Радиоэлектронная борьба в Вооружённых силах США: военно-теоретический труд. - СПб.: Научно-технические технологии, 2018. – 131 с.
2. Дятлов А.П., Дятлов П.А., Кульбикаян Б.Х. Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами. – М.: Радио и связь, 2004. 227 с. ISBN: 5-256-01750-0
3. Батенков К.А., Батенков А.А. Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости // Труды СПИИРАН. 58 (2018), С.128–159. <https://doi.org/10.15622/sp.58.6>
4. Yusuf M.N., Bakar K.b.A., Isyaku B., Saheed A.L. Review of Path Selection Algorithms with Link Quality and Critical Switch Aware for Heterogeneous Traffic in SDN. Int. J. Electr. Computer Eng. Syst. 2023;14(3). С. 345–370. <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.3.12>
5. Коцыняк М. А., Лаута О. С., Нечепуренко А. П., Штеренберг И. Г. Методика оценки устойчивости информационно-телекоммуникационной сети в условиях информационного воздействия // Труды учебных заведений связи. 2016. № 4. С. 82-87 DOI: 10.15688/jvolsu10.2017.2.2.
6. Одоевский С. М., Лебедев П. В. Расчет структурной устойчивости сети связи методом поглощения // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020666401 от 09.12.2020
7. Шерстнев О.Г. Определение показателей структурной надежности сети связи // Вестник РГРТУ. 2020. № 72 С. 48–54.
8. Якушенко С.А., Дворников С.В. Математическая модель оценки структурной связности сложных систем с неустойчивыми связями. Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. 2019. С. 199–206.
9. Батенков К.А. Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний // Труды СПИИРАН. 18 (2019). С. 1093–1118. <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118>
10. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий // Информационно-управляющие системы. 6(2021). С. 53–63. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-53-63>
11. Lashgari M., Tonini F., Capacchione M., Woosinka L., Rigamonti G., Monti P. Techno-economics of Fiber vs. Microwave for Mobile Nransport Network Deployments. J. Opt. Comm. and Netw. 2023;15(7):C.74–87. <https://doi.org/10.1364/JOCN.482865>
12. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Анализ вероятности связности телекоммуникационной сети на основе инверсий ее состояний. Вестник Томского государственного университета // Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 59. С.91–98. DOI: 10.17223/19988605/59/10
13. 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. №20(2). С.371–406. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.5>

14. Bosisio A., Berizzi A., Lupis D., Morotti A., Iannarelli G., Greco B. A Tabu-search-based Algorithm for Distribution Network Restoration to Improve Reliability and Resiliency. J. Modern Power Systems and Clean Energy. 2023;11(1):302–311. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000150>
15. Анфёров М.А. Алгоритм поиска подкритических путей на сетевых графиках // Российский технологический журнал. 2023. Том 11. №1(23). С. 60–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-60-69>

PROBABILISTIC MODEL FOR ESTIMATING THE STRUCTURAL CONNECTIVITY OF NETWORKS RADIO ENGINEERING SYSTEMS IN CONDITIONS OF DESTRUCTIVE IMPACTS

Yakushenko S.A.¹, Shevyakov V.D.², Sadovnikov V.E.³, Gladkikh D.S.⁴

Keywords: radio engineering networks of information transmission, network stability, network survivability, network graph, equilibrium state, Bernoulli formula, network stability.

Abstract

The purpose of the work is to develop a methodological approach to assessing the structural connectivity of integrated radio engineering systems with the probabilistic nature of internode connections based on the analysis and generalization of the structural properties of network data graphs.

Research method: the research method combines a complex combination of the Bernoulli model and simulation modeling based on the MATLAB software platform to calculate the probability of successful connection between the nodes of the radio engineering information transmission network. This approach allows taking into account the uncertainty factor and multifaceted processes when modeling structural connectivity. An important aspect is the presence of equilibrium probabilities of communication between all nodes of the network, which allows you to use the probabilistic Bernoulli model to calculate the structural connectivity of the vertices of a network graph.

Results of the study: the results will allow us to assess the structural connectivity of radio engineering networks in the dynamics of changes in probabilistic inter-node connections, as well as to formulate scientifically based requirements for the structural parameters of the network, such as the number of nodes, branches and inter-node connections for the successful functioning of the network under the influence of external destructive factors. These aspects will form the basis for the further development of algorithms and methods for analyzing and evaluating properties military communication networks.

Scientific novelty: for the first time, the probabilistic Bernoulli model is used in combination with simulation modeling in the MATLAB software environment for quantitative assessment and comparative analysis of the structural connectivity of radio engineering information transmission networks, which makes it possible to simulate various situations of a probabilistic nature that arise under destructive external influences. The paper presents a formalized approach to the calculation of structural connectivity, taking into account the degree of influence and contribution of structural parameters to the overall assessment of the stability of radio engineering networks.

References

1. Mihajlov. R.L. Radioelektronnaja bor'ba v Vooruzhjonnyh silah SShA: voenno-teoreticheskij trud. - SPb.: Naukojomkie tehnologii, 2018. – 131 s.
2. Djatlov A.P., Djatlov P.A., Kul'bikajan B.H. Radioelektronnaja bor'ba so sputnikovymi radi-onavigacionnymi sistemami. – M.: Radio i svjaz', 2004. 227 s. ISBN: 5-256-01750-0
3. Batenkov K.A., Batenkov A.A. Analiz i sintez struktur setej svjazi po determinirovannym pokazateljam ustojchivosti // Trudy SPIIRAN. 58 (2018), S.128–159. <https://doi.org/10.15622/sp.58.6>
4. Yusuf M.N., Bakar K.b.A., Isyaku B., Saheed A.L. Review of Path Selection Algorithms with Link Quality and Critical Switch Aware for Heterogeneous Traffic in SDN. Int. J. Electr. Computer Eng. Syst. 2023;14(3). S. 345–370. <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.3.12>

¹Sergey A. Yakushenko, Dr.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Military Academy of Communications named after S.M. Budenny, St. Petersburg, Russia. E mail: was16@mail.ru

²Vladislav D. Shevyakov, Junior Researcher, S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: Vlad89312239540.la@yandex.ru

³Vladimir E. Sadovnikov, Junior Researcher, S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: bladimir1998@mail.ru

⁴Dmitry S. Gladkikh, Junior Researcher, S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: mr.zid2004@mail.ru

5. Kocynjak M. A., Lauts O. S., Nechepurenko A. P., Shterenberg I. G. Metodika ocenki ustojchi-vosti informacionno-telekommunikacionnoj seti v uslovijah informacionnogo vozdejstviya // Trudy uchebnyh zavedenij svjazi. 2016. № 4. S. 82-87 DOI: 10.15688/jvolsu10.2017.2.2.
6. Odoevskij S. M., Lebedev P. V. Raschet strukturnoj ustojchivosti seti svjazi metodom po-gloshhenija // Svidetel'stvo o registracii programmy dlja JeVM RU 2020666401 ot 09.12.2020
7. Sherstnev O.G. Opredelenie pokazatelej strukturnoj nadezhnosti seti svjazi // Vestnik RGRTU. 2020. № 72. C. 48–54.
8. Jakushenko S.A., Dvornikov S.V. Matematicheskaja model' ocenki strukturnoj svjaznosti slozhnyh sistem s neustojchivymi svjazjami. Volnovaja jelektronika i infokommunikacionnye sistemy. 2019. S. 199–206.
9. Batenkov K.A. Tochnye i granichnye ocenki verojatnostej svjaznosti setej svjazi na osnove me-toda polnogo perebora tipovyh sostojanij // Trudy SPIIRAN. 18 (2019). S. 1093–1118. <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118>
10. Batenkov A.A., Batenkov K.A., Fokin A.B. Verojatnost' svjaznosti telekommunikacionnoj seti na osnove privedenija neskol'kih sobytij nesvjaznosti k ob#edineniju nezavisimyh sobytij // Informacionno-upravljajushhie sistemy. 6(2021). S. 53–63. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-53-63>
11. Lashgari M., Tonini F., Capacchione M., Woosinka L., Rigamonti G., Monti P. Techno-economics of Fiber vs. Microwave for Mobile Ntransport Network Deployments. J. Opt. Comm. and Netw. 2023;15(7):C.74–87. <https://doi.org/10.1364/JOCN.482865>
12. Batenkov A.A., Batenkov K.A., Fokin A.B. Analiz verojatnosti svjaznosti telekommunikaci-onnoj seti na osnove inversij ee sostojanij. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta // Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika. 2022. № 59. S.91–98. DOI: 10.17223/19988605/59/10
13. Batenkov A.A., Batenkov K.A., Fokin A.B. Formirovanie sechenij telekommunikacionnyh setej dlja analiza ih ustojchivosti s razlichnymi merami svjaznosti // Informatika i avtomatizacija. 2021. №20(2). S.371–406. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.5>
14. Bosisio A., Berizzi A., Lupis D., Morotti A., Iannarelli G., Greco B. A Tabu-search-based Algo-rithm for Distribution Network Restoration to Improve Reliability and Resiliency. J. Modern Power Systems and Clean Energy. 2023;11(1):302–311. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000150>
15. Anfjorov M.A. Algoritm poiska podkriticheskikh putej na setevykh grafikah // Rossijskij tehnologicheskij zhurnal. 2023. Tom 11. №1(23). S. 60–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-60-69>

