

УДК 004.52.60

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.039](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.039)

Статистическое оценивание показателей структурной надежности мобильных систем передачи данных

В.Е. Гвоздев¹, М.Б. Гузаиров¹, А.С. Ракипова^{1✉}, Р.Р. Галимов², Д.В. Янчиев¹

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

²Федеральное казенное предприятие «Авангард», Стерлитамак, Российская Федерация

Резюме. Центральная роль инфосферы в системах сетецентрического управления группами мобильных киберфизических систем обуславливает принципиальную значимость обеспечения функциональной надежности и живучести систем информационного взаимодействия устройств. Одним из факторов функциональной надежности систем информационного взаимодействия является структурная надежность систем передачи данных. Работа посвящена построению дескриптивных моделей показателей структурной надёжности мобильных систем передачи данных при влиянии разрушающих воздействий на каналы и узлы сети. Методом имитационного моделирования выполнено исследование влияния разрушения ребер в случайном графе на связность сети в зависимости от показателя – доли разрушенных узлов графа. Выявлены особенности средних значений и устойчивости показателя при разных характеристиках случайных графов. Оценено влияние свойства мобильности киберфизических устройств группы «рой» на показатели структурной надежности – сложность и неравномерность распределения нагрузки между узлами системы передачи данных. Показано, что использование такого ресурса мобильных групп киберфизических систем, как способность устройств перемещаться, является способом парирования деструктивных воздействий. Вследствие перемещения узлов происходит повышение устойчивости показателей структурной надежности – сложности структуры и неравномерности распределения нагрузки между узлами сети.

Ключевые слова: сетецентрическое управление, мобильные группы киберфизических устройств, структурная надежность систем передачи данных, дескриптивные модели, деструктивные воздействия, парирование деструктивных воздействий.

Для цитирования: Гвоздев В.Е., Гузаиров М.Б., Ракипова А.С., Галимов Р.Р., Янчиев Д.В. Статистическое оценивание показателей структурной надежности мобильных систем передачи данных. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1989> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.039

Statistical estimation of structural reliability indicators of mobile data transmission systems

V.E. Gvozdev¹, M.B. Guzairov¹, A.S. Rakipova^{1✉}, R.R. Galimov², D.V. Yanchiev¹

¹Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation

²Federal State Enterprise "Avangard", Sterlitamak, the Russian Federation

Abstract. The central role of the infosphere in network-centric control systems for groups of mobile cyber-physical systems determines the fundamental importance of ensuring functional reliability and survivability of information interaction systems. One of the factors of functional reliability of information interaction systems is the structural reliability of data transmission systems. The work is devoted to the construction of descriptive models of structural reliability indicators of mobile data transmission systems under the influence of destructive effects on network channels and nodes. Using the method of simulation modeling, a study was conducted on the influence of edge destruction in a random graph on network connectivity depending on the indicator – the proportion of destroyed graph nodes. The features of the average values and stability of the indicator for different characteristics of

random graphs are revealed. The influence of the mobility property of cyber-physical devices in the «swarm» group on the indicators of structural reliability – complexity and unevenness of load distribution between the nodes of the data transmission system is assessed. It is shown that the use of such a resource of mobile groups of cyber-physical systems as the ability of devices to move is a way to counter destructive effects. As a result of the movement of nodes, there is an increase in the stability of structural reliability indicators – the complexity of the structure and the uneven distribution of the load between network nodes.

Keywords: network-centric control, mobile groups of cyber-physical devices, structural reliability of data transmission systems, descriptive models, destructive effects, countering destructive effects.

For citation: Gvozdev V.E., Guzairov M.B., Rakipova A.S., Galimov R.R., Yanchiev D.V. Statistical estimation of structural reliability indicators of mobile data transmission systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1989> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.039

Введение

В настоящее время управленческая парадигма сетецентрического управления находит широкое освещение в научных изданиях и активно внедряется в практику решения задач управления в различных областях деятельности (военной, финансовой, производственной, проектной и др.) [1]. Отмечается, что информосфера в современную постиндустриальную эпоху приобрела первостепенное значение как фактор, определяющий состояние и поведение территориально распределенных динамических систем¹. Преимущества или недостатки в получении, накоплении, передаче, обработке, представлении и охране информации приобретают решающее значение. В литературных источниках подчеркивается, что центральная роль инфосферы в системах децентрализованного управления сложными системами, обуславливает принципиальную значимость обеспечения надежности и живучести информационных систем. В рамках общей теории надежности выделилось направление «Функциональная надежность», которое должно охватывать всю совокупность выявленных к настоящему времени факторов, влияющих на надежность на разных стадиях жизненного цикла изделий. Одним из разделов этого направления является «Структурная надежность» [2, 3].

Принципиально новый уровень сложности систем сбора (мобильные сети, космический интернет, «умная пыль» и др.), передачи, организации хранения и предоставления информации в системах сетецентрического управления обуславливают качественное изменение содержания задач, связанных с управлением сетевыми системами, включая задачу обеспечения структурной надежности системы передачи данных. Подключенность (англ. – connectedness) – компонент, который является базовой характеристикой сетевых систем.

Решение многих прикладных задач сетецентрического управления основано на использовании интеллектуальных роботов. Комплекс интеллектуальных роботов должен решать следующую совокупность задач: осуществлять мониторинг (диагностику) состояния робота и решение локальных задач управления перемещением робота; планировать действия робота и обеспечивать взаимодействие роботов друг с другом для совместного решения задач, поставленных перед группой мобильных устройств; обеспечивать парирование последствий дестабилизирующих воздействий на компоненты группы (роботы и каналы связи) [4, 5]. В [6] отмечается, что несмотря на то, что основы децентрализованного управления киберфизическими системами

¹ Дугин А. Сетевые войны. Аналитический доклад Александра Дугина при участии Валерия Коровина и Александра Бовдунова. Сайт С.П. Курдюмова «Синергетика». URL: <https://spkurdyumov.ru/networks/setevye-voiny/> (дата обращения: 15.05.2025).

сформулированы достаточно давно, методическая основа для исследования разных подходов к управлению мобильных групп киберфизических устройств требует дальнейшего развития. В качестве самостоятельных задач следует выделить построение цифровых образов систем передачи данных в мобильных группах, соответствующих разным ситуациям, а также целенаправленное реконфигурирование топологии мобильной сети передачи данных как реакцию на разрушение компонентов сети в результате деструктивных воздействий [7].

Целью исследований, результаты которых представлены ниже, являлось исследование статистических характеристик показателей структурной надежности сетей передачи данных в группах киберфизических систем при разрушении каналов и узлов сетей.

Задачами исследований являлись:

- оценка влияния исходного размера сети и вероятности разрушения каналов на статистические характеристики показателя структурной надежности;
- оценка значимости влияния свойства мобильности киберфизических систем на устойчивость показателей структурной надежности сети передачи данных при разных вероятностях разрушения узлов.

В статье представлены дескриптивные модели показателей структурной надёжности мобильных систем передачи данных при влиянии разрушающих воздействий на каналы и узлы сети.

Материалы и методы

Статистическое оценивание последствий случайных разрушений каналов на связность сети. Надежность является системной характеристикой, и она может представляться различными частными параметрами. Обзор литературы позволил выявить достаточно большое число количественных топологических параметров, которые могут выступать в качестве характеристик структурной надежности на физическом и логическом уровнях рассмотрения систем передачи данных [8, 9]. К параметрам, косвенно характеризующим структурную надежность систем передачи данных на физическом и логическом уровнях и положенным в основу проводившихся имитационных экспериментов, относятся:

- 1) Степень центральности, характеризующая неравномерность загрузки элементов структуры посредством числа путей, проходящих через узел.
- 2) Сложность структуры, определяемая нормированным количеством путей, соединяющих разные пары вершин.
- 3) Средняя степень узла. Является косвенной характеристикой влияния разрушения узла на структуру сети передачи данных.

Ниже представлены результаты статистического оценивания влияния исходного размера полносвязной сети и вероятности разрушения физических каналов на связность сети (подключенность), которая ставится в соответствие группе мобильных киберфизических устройств, именуемой «коллективом»² [7, 10].

Основу исследований составлял вычислительный эксперимент, схема которого приводится ниже.

1. Задается число узлов графа M ($M = 20; 40; 70; \dots$), а также вероятность p наличия ребер между парами узлов. По схеме Бернулли (описана ниже) формируется граф, в котором наличие ребер определяется значением p . Если граф изначально оказывается несвязным, осуществляется генерация нового графа до тех пор, пока число графов не окажется равным M . В противном случае графу ставится в соответствие

² Гайдук А.Р., Каляев И.А., Капустян С.Г., Кухаренко А.П. *Модели и методы управления большими группами роботов*. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета; 2014. 106 с.

квадратная матрица смежности, ячейки которой при наличии ребра заполнены единицами; при отсутствии ребра – нулями.

2. На каждой итерации в сформированном графе случайным образом удаляется одно из ребер, т. е. случайным образом обнуляется одна из ячеек матрицы, в которых записаны единицы. Случайное удаление ребер осуществляется до тех пор, пока сеть не потеряет связность, формальным признаком чего является пересечение в матрице пустой строки и пустого столбца.

3. Опыт проводится $N = 1000$ раз. Результатом j -го опыта $j = \overline{(1, N)}$ при заданном M является случайная величина, характеризующая долю оставшихся ребер при том, что нарушается связность сети. По результатам опытов формируется выборка $\{\xi\}_N^1$ случайных величин, элементами которой являются доли ребер, оставшихся не удаленными при j -м прогоне эксперимента $j = \overline{(1, N)}$ при том, что терялась связность графа.

4. По сформированным выборкам строятся зависимости, определяющие среднюю долю оставшихся ребер, при которой имеет место потеря связности, а также границы интервалов, в которых лежат доли (Рисунок 1).

5. Строятся оценки дифференциальных функций распределения доли не удаленных ребер, соответствующих различным M , при том, что происходит потеря связности (Рисунок 2).

На Рисунке 1 представлены интервальные оценки долей оставшихся ребер, при которых теряется связность графа. Результаты соответствуют разному числу вершин графа M и значениям вероятности p изначального наличия ребер между парами узлов в начале j -го эксперимента.

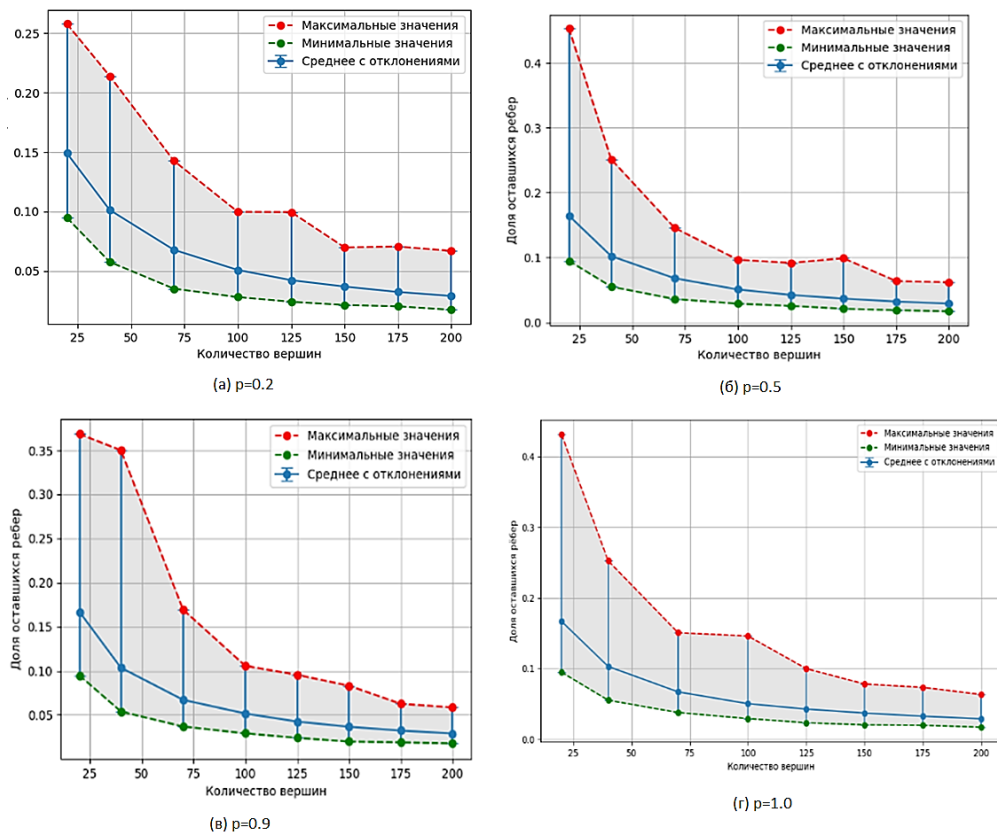


Рисунок 1 – Статистические характеристики долей оставшихся ребер, при которых сохраняется связность сети передачи данных

Figure 1 – Statistical characteristics of the proportions of remaining edges at which the connectivity of the data transmission network is maintained

В Таблице 1 представлены статистические характеристики долей удаленных ребер, при которых происходит потеря связности при разных исходных значениях M и p .

На Рисунках 2 и 3 в качестве примеров представлены оценки дифференциальных функций распределения долей удаленных ребер, приводящие к потере связности графа при различных значениях M и p .

Таблица 1 – Статистические характеристики долей удаленных ребер приводящие к потере связности

Table 1 – Statistical characteristics of the proportions of removed edges leading to loss of connectivity

Число вершин M $p=0,2$	Средняя доля разрушенных ребер, (%)	Медиана долей разрушенных ребер, (%)	СКО долей разрушенных ребер, (%)
20	85,08	85,26	2,72
40	89,86	90,25	2,41
70	93,21	93,49	1,70
100	94,90	95,11	1,14
125	95,76	95,94	0,93
150	96,30	96,45	0,79
175	96,76	96,90	0,70
200	97,09	97,21	0,61

Число вершин M $p=0,5$	Средняя доля разрушенных ребер, (%)	Медиана долей разрушенных ребер, (%)	СКО долей разрушенных ребер, (%)
20	83,56	84,73	4,53
40	89,78	90,38	2,70
70	93,19	93,51	1,71
100	94,92	95,13	1,13
125	95,76	95,89	0,91
150	96,32	96,49	0,84
175	96,78	96,89	0,68
200	97,09	97,19	0,60

Число вершин M $p=0,9$	Средняя доля разрушенных ребер, (%)	Медиана долей разрушенных ребер, (%)	СКО долей разрушенных ребер, (%)
20	83,31	84,21	4,39
40	89,65	90,12	2,76
70	93,28	93,62	1,67
100	94,84	95,05	1,19
125	95,75	95,94	0,98
150	96,34	96,46	0,76
175	96,77	96,88	0,68
200	97,09	97,21	0,59

Число вершин M $p=1,0$	Средняя доля разрушенных ребер, (%)	Медиана долей разрушенных ребер, (%)	СКО долей разрушенных ребер, (%)
20	83,32	84,21	4,52
40	89,70	90,25	2,67
70	93,30	93,58	1,53
100	94,97	95,15	1,12
125	95,73	95,89	0,99
150	96,30	96,45	0,83
175	96,74	96,88	0,68
200	97,11	97,18	0,58

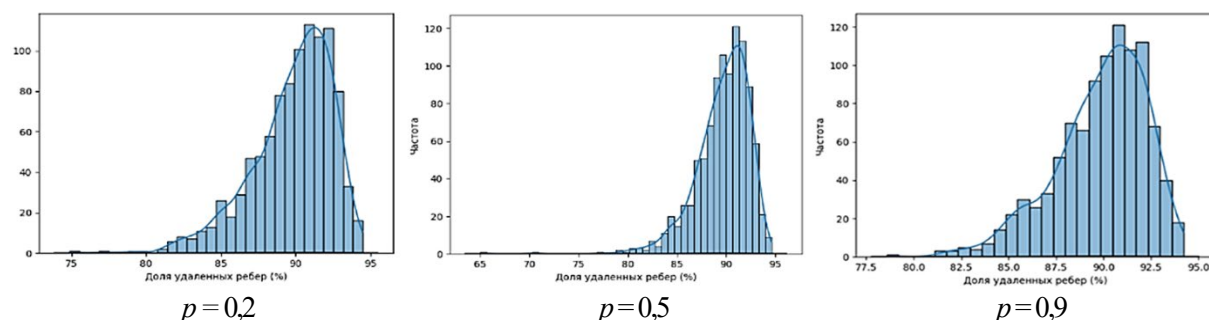


Рисунок 2 – Оценки дифференциальных функций распределения долей удаленных ребер, приводящие к потере связности графа. Число узлов $M = 40$

Figure 2 – Estimates of differential distribution functions of shares of removed edges, leading to loss of graph connectivity. Number of nodes $M = 40$

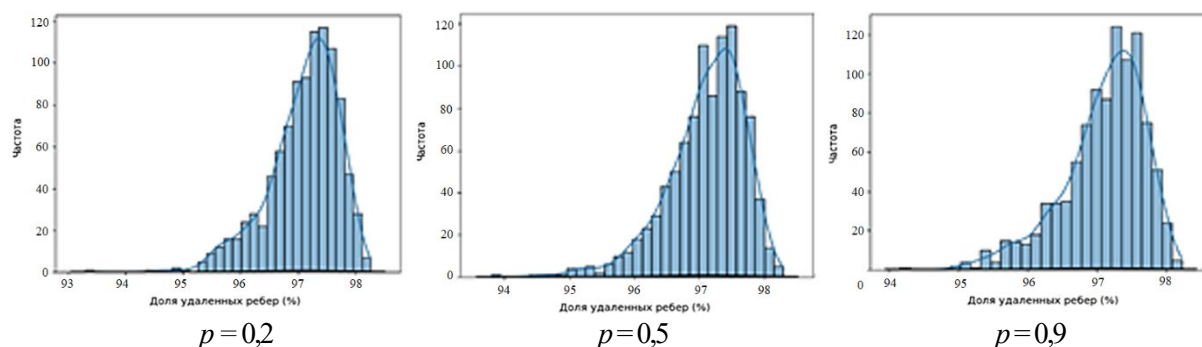


Рисунок 3 – Оценки дифференциальных функций распределения доли удаленных ребер, приводящие к потере связности графа. Число узлов $M = 200$
Figure 3 – Estimates of differential distribution functions of the proportion of removed edges that lead to loss of connectivity of the graph. Number of nodes $M = 200$

На Рисунках 4 и 5 в качестве примеров представлены оценки дифференциальных функций распределения долей оставшихся ребер, при которых еще не происходит потери связности графа при различных значениях M и p .

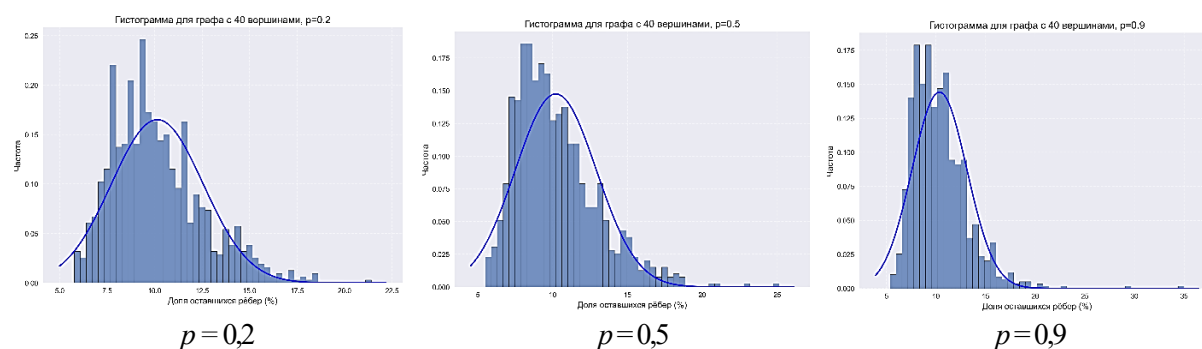


Рисунок 4 – Оценки дифференциальных функций распределения оставшихся ребер, при которых еще не происходит потери связности графа. Число узлов $M = 40$
Figure 4 – Estimates of the differential distribution functions of the remaining edges at which the loss of graph connectivity has not yet occurred. Number of nodes $M = 40$

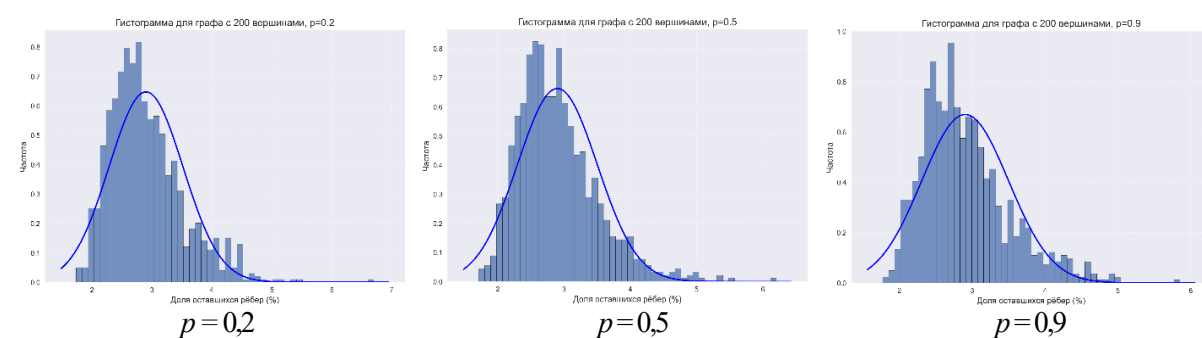


Рисунок 5 – Оценки дифференциальных функций распределения оставшихся ребер, при которых еще не происходит потери связности графа. Число узлов $M = 200$
Figure 5 – Estimates of the differential distribution functions of the remaining edges at which the loss of graph connectivity has not yet occurred. Number of nodes $M = 200$

Незначительное различие значений средней доли разрушенных ребер, медианы долей удаленных ребер, а также малое значение среднеквадратического отклонения (СКО) долей разрушенных ребер по сравнению со средним значением доли разрушенных ребер, дает основание для использования в качестве закона распределения

доли ребер, удаление которых приводит к потере связности полносвязного графа, нормальный закон распределения.

Результаты моделирования позволяют заключить, что доли ребер, при разрушении которых происходит потеря связности, практически не зависят от исходного числа узлов сети. При этом значение СКО доли ребер, разрушение которых приводит к потере связности, уменьшается по мере увеличения исходного числа узлов, т. е. устойчивость характеристики структурной надежности (связности) к разрушению ребер графа увеличивается.

Полученные данные служат основанием для того, чтобы определить границы интервала, в котором с заданной доверительной вероятностью лежит возможное изменение значения доли удаляемых каналов, при которой происходит потеря связности полносвязной сети. С прикладной точки зрения это является одной из характеристик живучести сети.

На Рисунках 6 и 7 в качестве примера представлены дифференциальные функции распределения долей k -звенных путей в общем числе путей в графе для разного числа узлов и $p = 0,5$, что, в свою очередь, позволяет оценить среднюю (по числу звеньев) длину путей в графе. Полученные статистические оценки создают возможность оценивания такого показателя функциональной надежности как задержки передачи сообщений в мобильной группе. Следует отметить, что k -звенным путям соответствуют находящиеся в режиме «горячего резервирования» физические пути передачи данных.

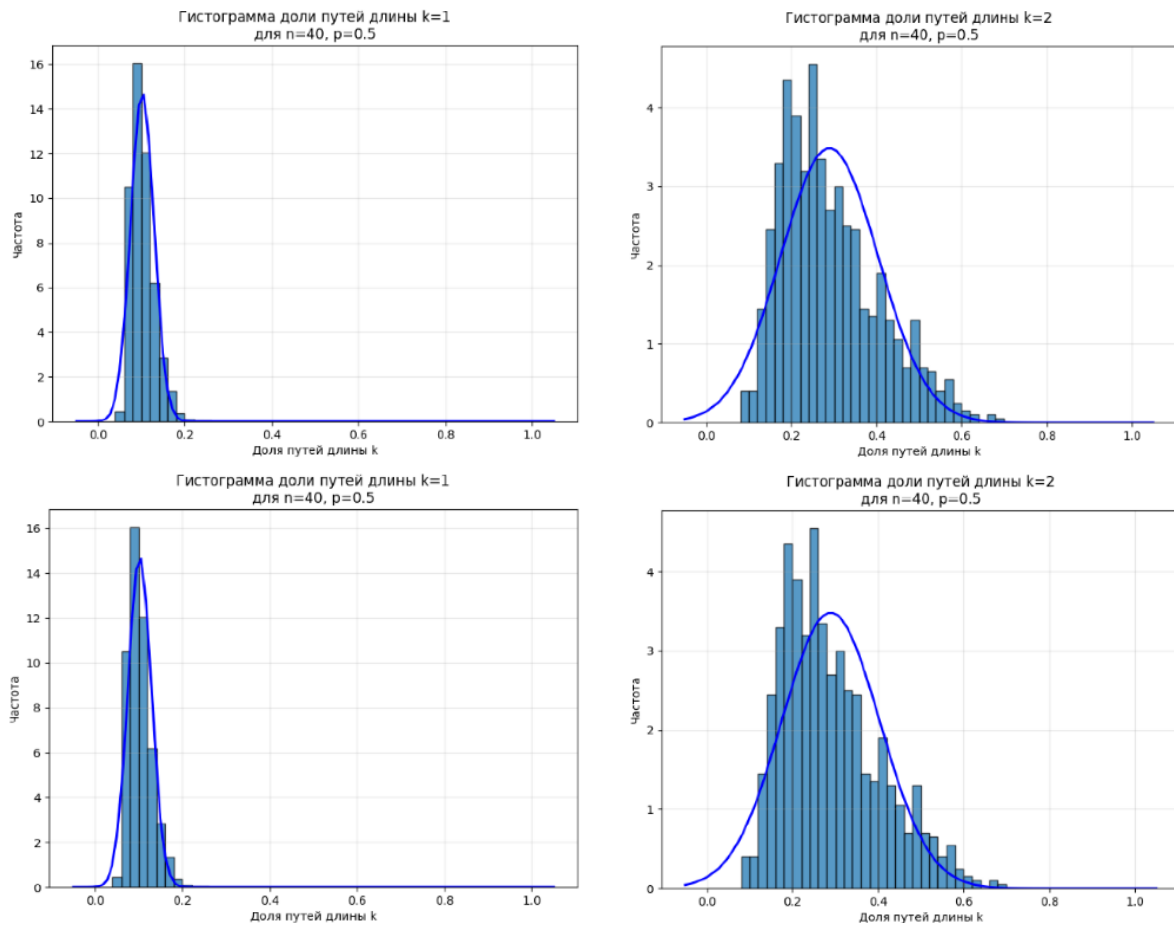


Рисунок 6 – Дифференциальные функции распределения долей k -звенных путей в общем числе путей при $M = 40$ и $p = 0,5$

Figure 6 – Differential distribution functions of the proportions of k -link paths in the total number of paths for $M = 40$ and $p = 0.5$

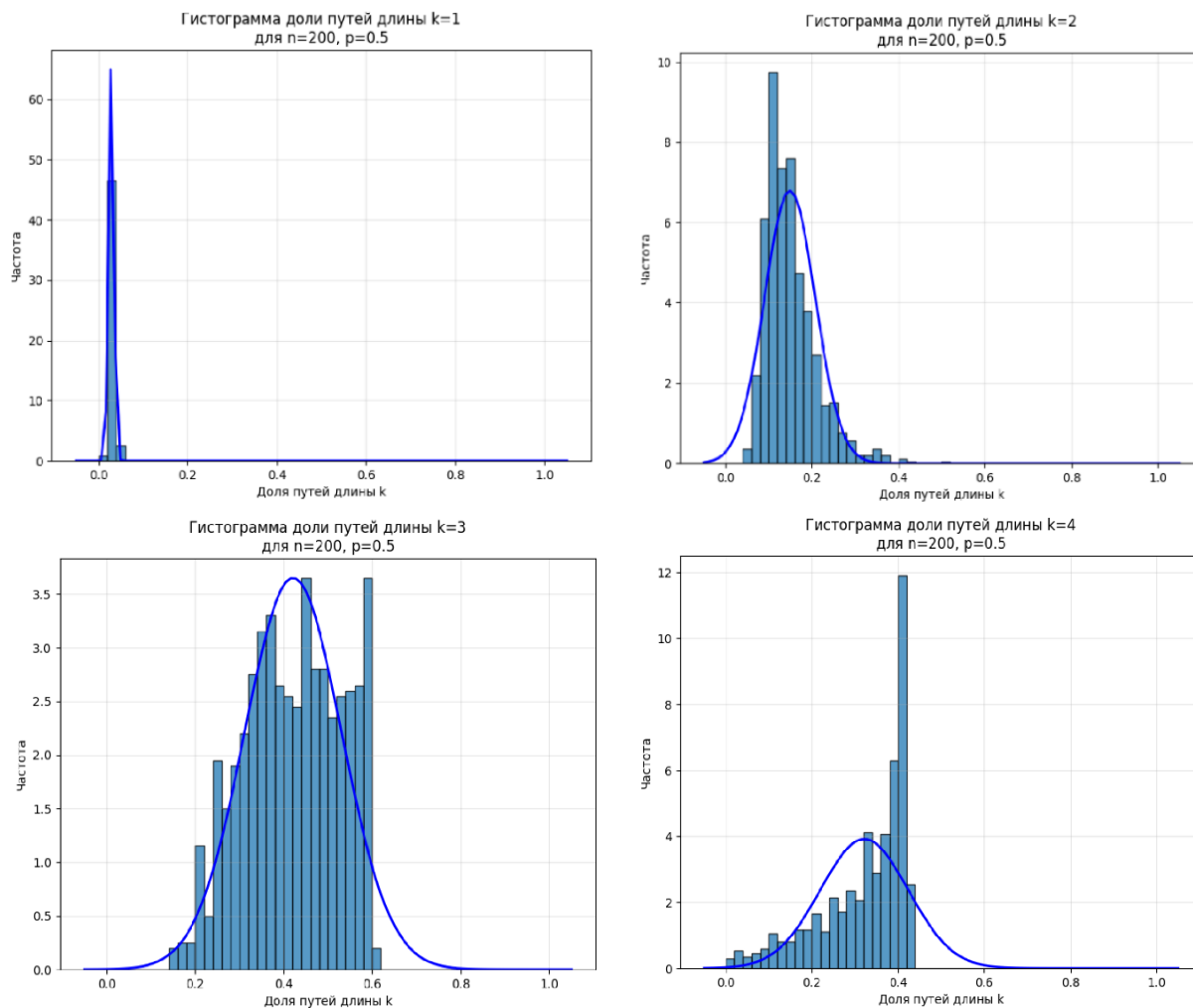


Рисунок 7 – Дифференциальные функции распределения долей k -звенных путей в общем числе путей при $M = 200$ и $p = 0,5$

Figure 7 – Differential distribution functions of the proportions of k -link paths in the total number of paths for $M = 200$ and $p = 0.5$

В Таблице 2 в качестве примера представлены статистические характеристики k -звенных путей в общем числе путей при различном числе узлов графа при $p = 0,5$.

Знание оценок законов распределения путей разной длины k (k -звенных путей) позволяет получить статистические оценки такой характеристики функциональной надежности как время доставки сообщений в сети при разрушении каналов. Прикладная важность этой задачи подчеркивается, например, в [11].

Влияние реконфигурирования топологии на свойства сети при разрушении узлов. Обеспечение эффективного управления группой мобильных устройств требует своевременного информирования центра управления о состоянии каждого устройства, а также состояния среды, в которой они находятся. Непосредственное взаимодействие всех устройств между собой сокращает доступную полосу пропускания канала передачи сообщений, связанных с реализацией задач центра управления. В силу этого целесообразно обеспечивать взаимодействие на равноправной основе каждого киберфизического устройства лишь с соседними роботами, попадающими в зону действия его приемопередатчика, а взаимодействие с центром управления осуществлять через базовые станции, в роли которых могут выступать не только наземные, но и мобильные устройства (англ. – Message Ferry) [12, 13].

Таблица 2 – Статистические характеристики распределения длин путей в графе при различных размерах сети ($p = 0,5$)

Table 2 – Statistical Characteristics of Path Length Distribution in the Graph for Different Network Sizes ($p = 0.5$)

Длина пути, число вершин	Средняя доля пути длины k в общем числе пути	СКО доли пути длины k в общем числе пути	Средняя доля пути длины k в общем числе пути	СКО доли пути длины k в общем числе пути	Средняя доля пути длины k в общем числе пути	СКО доли пути длины k в общем числе пути	Средняя доля пути длины k в общем числе пути	СКО доли пути длины k в общем числе пути	Средняя доля пути длины k в общем числе пути	СКО доли пути длины k в общем числе пути
$k = 1$	$k = 2$		$k = 3$		$k = 4$		$k = 5$		$k = 6$	
20	0,16	0,04	0,27	0,06	0,13	0,07	0,05	0,05	0,02	0,03
40	0,10	0,02	0,34	0,06	0,17	0,08	0,05	0,06	0,01	0,03
70	0,06	0,01	0,39	0,08	0,20	0,09	0,05	0,06	0,01	0,02
100	0,05	0,01	0,41	0,08	0,24	0,10	0,06	0,06	0,01	0,02
125	0,04	0,009	0,42	0,09	0,27	0,09	0,06	0,06	0,009	0,02
150	0,03	0,008	0,42	0,10	0,28	0,10	0,06	0,07	0,009	0,02
175	0,03	0,006	0,42	0,10	0,30	0,10	0,06	0,07	0,008	0,01
200	0,02	0,006	0,42	0,10	0,32	0,10	0,06	0,07	0,007	0,01

Топологии сети передачи данных в группах киберфизических систем типа «рой» задаются так, что каждый узел может взаимодействовать лишь с соседними узлами на расстоянии одного перехода [14]. В дальнейшем в качестве топологии системы передачи данных рассматривается «решетка с диагональными связями», представленная на Рисунке 8а. В [15] такие связи между узлами именуются «связями подключения». Там же отмечается, что, хотя реальные сети могут иметь более сложную топологию, решетка может служить эталоном для изучения свойств сетей.

В [16] в качестве характеристических признаков сетей выделяются степени узлов или посредничество (node degree or betweenness).

Ниже представлены результаты сопоставления статистических характеристик сети передачи данных при различных способах реагирования на изменение топологии сети при разных вероятностях разрушения узлов в результате деструктивных воздействий.

В ходе проводившихся исследований, во-первых, исходили из того, что все компоненты сети являются гомогенными, и в результате деструктивных воздействий вероятность разрушения каждого атакуемого узла одинаковая. В случае топологии типа «решетка» с диагональными связями возможны две ситуации: в первой узлы просто удаляются и перемещения оставшихся узлов не происходит (Рисунок 8а). В этом случае нарушается условие того, что каждый узел может находиться по отношению к соседу на расстоянии одного перехода. Так, например, узлы 4 и 6 являются соседними, но количество переходов между ними превышает один (Рисунок 8а). В иной ситуации число узлов уменьшается, однако за счет перемещения узлов, каждый из узлов сети по-прежнему связан с соседями, одним переходом (Рисунок 8б). Во-вторых, отказом группы считается сокращение числа работоспособных узлов до некоторого заранее заданного критического значения.

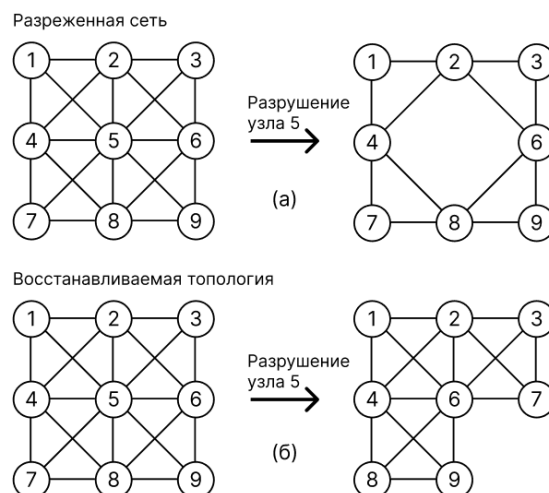


Рисунок 8 – Разные способы формирования топологий в случае разрушения узлов
Figure 8 – Different methods of forming topologies in the case of node destruction

Результаты и обсуждение

Основу исследований составлял статистический эксперимент, описание которого приводится ниже.

1. Задается число узлов сети M , вероятность поражения узла p и коэффициент α , характеризующий долю узлов сети, подвергающихся воздействиям. Определяется значение N ($N = \text{int}(\alpha \cdot M)$), характеризующее количество узлов, подвергающихся воздействиям.

2. Сеть считается работоспособной, если число ее узлов не меньше некоторой величины. Задается значение β , при котором сеть считается работоспособной, на основе которого определяется число узлов m_2 : $m_2 = ((1 - \beta) \cdot M)$. Считается, что пока число связанных узлов в группе больше m_2 , группа считается работоспособной.

3. Циклически задается номер деструктивного воздействия $L = 1, 2, \dots$

4. Случайным образом выбираются N узлов из M при L -м деструктивном воздействии.

5. Для каждого выбранного атакуемого узла по схеме Бернулли определяется состояние разрушения³ B :

$$B: 1, p \sim \begin{cases} 1 & R \leq p \\ 0 & R > p \end{cases} \quad (1)$$

Здесь R – равномерно распределенная на отрезке $[0,1]$ случайная величина. Если B принимает значение единицы, узел остается работоспособным. В противном случае узел уничтожается.

6. Определяется число фактически пораженных узлов m_1 .

7. Формируется новая топология сети с учетом того, к какому виду относится сеть: решетка без перемещения узлов, или решетка с соблюдением условия «расстояние одного перехода» (Рисунки 8а и 8б).

8. На основе измененной топологии строится матрица достижимости и выделяются узлы, которые стали недостижимыми (отсутствие путей между узлами). Такие узлы из дальнейшего рассмотрения исключаются.

³ Хастингс Н., Пикок Дж. *Справочник по статистическим распределениям*. Москва: Статистика; 1980. 95 с.

9. Оцениваются последствия деструктивных воздействий по показателям, характеризующим среднее число кратчайших путей $\mathfrak{A}_1$ (среднее значение степени посредничества Фримана) и среднее число путей в графе $\mathfrak{A}_2$:

$$\mathfrak{A}_1 = \frac{\sum_{k=1}^n e_k}{n}; \mathfrak{A}_2 = \frac{\sum_{k=1}^n \text{len}(e_k)}{n}, \quad (2)$$

где e_k – число кратчайших путей, проходящих через k -й узел; $\text{len}(e_k)$ – общее число путей, проходящих через k -й узел.

Определяется параметр

$$R_1 = \mathfrak{A}_2 / \mathfrak{A}_1, \quad (3)$$

характеризующий сложность структуры, и отношение

$$R_2 = \mathfrak{A}_1 / \mathfrak{A}_2, \quad (4)$$

характеризующее среднюю центральность, т. е. неравномерность распределения нагрузки между узлами сети.

Значения $\mathfrak{A}_1$, $\mathfrak{A}_2$ определяются для каждого L -го деструктивного воздействия.

10. После атаки, приводящей к разрушению узлов, переопределяется число работоспособных узлов сети $M = M - m_1$; номер итерации увеличивается на единицу и выполняется переход к шагу 4.

11. Эксперимент продолжается до тех пор, пока число узлов в группе не окажется меньше m_2 .

Ниже представлены результаты, соответствующие значениям $\alpha = 0,1$ и $\beta = 0,9$.

На Рисунке 9 в качестве примера представлены зависимости средних значений характеристик сложности R_1 , соответствующих разным L , от вероятности p при числе узлов $M = 100$.

В Таблице 3 в качестве примера представлены средние значения показателей $\mathfrak{A}_1$, $\mathfrak{A}_2$ и R_1 для графов разных размеров M , и вероятностей p для случая, когда перемещения узлов не происходит.

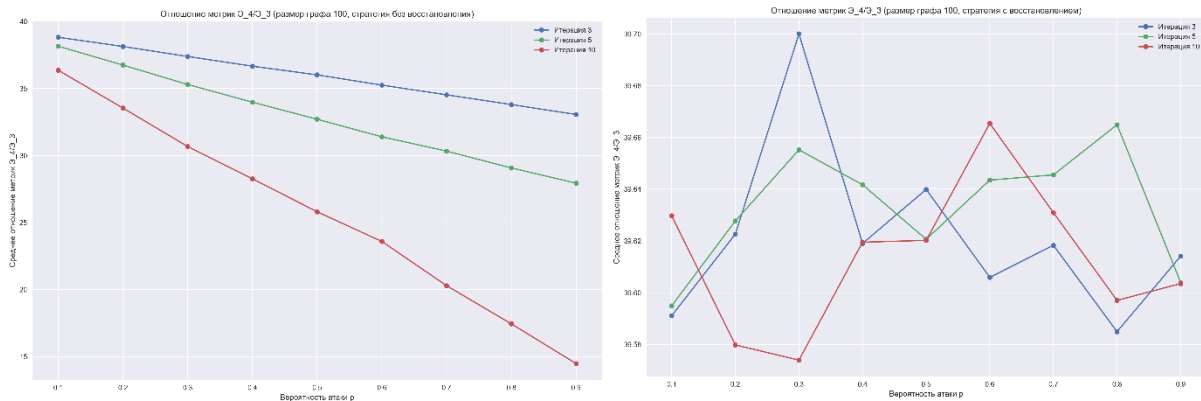


Рисунок 9 – Зависимость R_1 от вероятности p в случае, когда происходит и не происходит перемещение узлов

Figure 9 – Dependence of R_1 on the probability p in the case when node displacement occurs and does not occur

Таблица 3 – Статистические характеристики распределения длин путей в графе без реконфигурирования топологии ($p = 0,5$)

Table 3 – Statistical characteristics of path length distribution in the graph without topology reconfiguration ($p = 0.5$)

	ПЕРЕМЕЩЕНИЕ УЗЛОВ НЕ ПРОИСХОДИТ								
Значение L	$L = 3$			$L = 5$			$L = 10$		
Вероятность p , размер M	Ξ_2	Ξ_1	R_1	Ξ_2	Ξ_1	R_1	Ξ_2	Ξ_1	R_1
$p = 0,3$									
40	38,3949	2,959	12,982	36,6741	2,9742	12,345	33,0968	3,0296	10,98
100	172,306	4,611	37,377	163,501	4,6351	35,291	145,501	4,7545	30,667
200	531,486	6,608	80,441	503,369	6,642	75,801	445,806	6,8035	65,584
$p = 0,5$									
40	37,2042	2,964	12,565	34,7284	3,0061	11,581	28,5398	3,1133	9,2848
100	166,273	4,619	36,007	153,014	4,6836	32,699	129,165	5,0467	25,801
200	511,456	6,63	77,156	469,256	6,7161	69,899	391,085	7,2436	54,254
$p = 0,8$									
40	35,625	2,982	11,968	31,7655	3,0551	10,462	19,1515	2,9854	6,6876
100	157,463	4,662	33,794	139,749	4,8195	29,069	86,5238	5,1276	17,443
200	483,882	6,674	72,526	426,865	6,9116	61,843	256,954	7,7589	34,069

В Таблице 4 в качестве примера представлены средние значения показателей Ξ_1 , Ξ_2 и R_1 для графов разных размеров M , и вероятностей p для случая, когда происходит перемещение узлов.

Таблица 4 – Статистические характеристики распределения длин путей в графе при реконфигурировании топологии ($p = 0,5$)

Table 4 – Statistical characteristics of path length distribution in the graph with topology reconfiguration ($p = 0.5$)

	ПРОИСХОДИТ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ УЗЛОВ								
	Итерация 3			Итерация 5			Итерация 10		
Размер/ p	Ξ_2	Ξ_1	R_1	Ξ_2	Ξ_1	R_1	Ξ_2	Ξ_1	R_1
$p = 0,3$									
40	40,419	2,9495	13,7087	40,3815	2,9471	13,7071	40,3432	2,9484	13,6878
100	182,1809	4,5898	39,7	181,9855	4,59	39,6552	181,8979	4,5972	39,5739
200	561,9159	6,5888	85,2894	561,7465	6,5903	85,2433	562,2081	6,5886	85,3349
$p = 0,5$									
40	40,3655	2,9485	13,6957	40,3993	2,9467	13,715	40,4065	2,9452	13,7241
100	181,9719	4,5915	39,6399	181,8743	4,5911	39,6206	182,0178	4,5948	39,6202
200	561,9329	6,5869	85,3166	561,881	6,5877	85,2976	561,9727	6,5873	85,3164
$p = 0,8$									
40	40,475	2,9465	13,7414	40,4246	2,9441	13,7352	40,3655	2,9455	13,709
100	181,8331	4,5943	39,5849	182,0754	4,5912	39,6649	181,8734	4,5939	39,597
200	561,9348	6,5893	85,2853	561,9686	6,5868	85,3228	561,9307	6,5879	85,3024

На рисунке 10 в качестве примера представлены зависимости значений характеристики средней центральности R_2 , соответствующие разным L , от вероятности p при числе узлов $M = 100$ для случаев, когда перемещение узлов в случае разрушения не происходит.

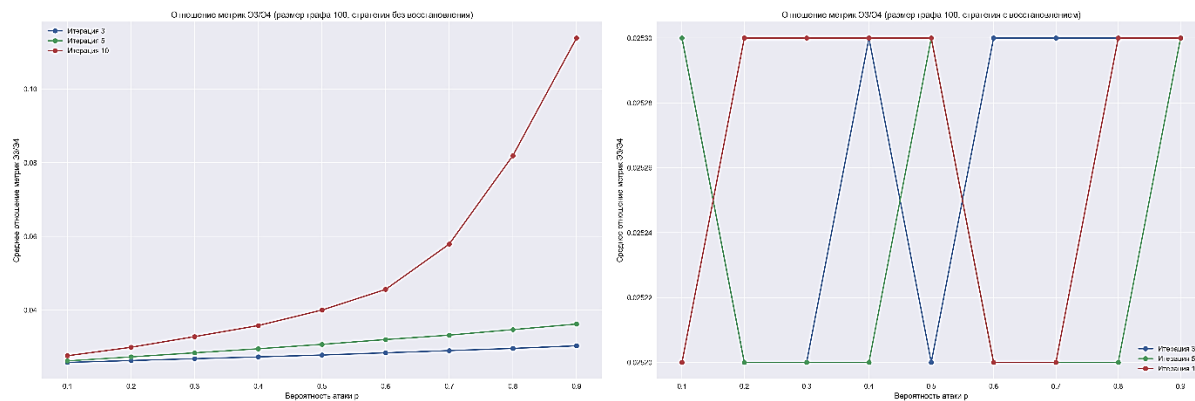


Рисунок 10 – Зависимость R_2 от вероятности p в случае, когда происходит и не происходит перемещение узлов

Figure 10 – Dependence of R_2 on the probability p in the case when node displacement occurs and does not occur

В Таблице 5 в качестве примера представлены средние значения показателей $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ и R_2 для графов разных размеров N , и вероятностей p для случая, когда перемещения узлов не происходит.

Таблица 5 – Статистические показатели структурной надежности сети при разрушении узлов без восстановления топологии (без перемещения узлов)

Table 5 – Statistical indicators of network structural reliability under node failures without topology recovery (without node relocation)

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ УЗЛОВ НЕ ПРОИСХОДИТ									
Размер/ p	Итерация 3			Итерация 5			Итерация 10		
	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_1$	R_2	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_1$	R_2	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_1$	R_2
$p = 0,3$									
40	38,3949	2,9597	0,0772	36,6741	2,9742	0,0814	33,0968	3,0296	0,0934
100	172,3066	4,6113	0,0268	163,5007	4,6351	0,0284	145,5004	4,7545	0,0328
200	531,4863	6,6079	0,0124	503,3693	6,642	0,0132	445,8062	6,8035	0,0153
$p = 0,5$									
40	37,2042	2,9638	0,0799	34,7284	3,0061	0,0872	28,5398	3,1133	0,1183
100	166,2732	4,6196	0,0278	153,0141	4,6836	0,0307	129,1646	5,0467	0,04
200	511,4564	6,63	0,013	469,2556	6,7161	0,0143	391,0846	7,2436	0,0187
$p = 0,8$									
40	35,625	2,9817	0,0841	31,7655	3,0551	0,0988	19,1515	2,9854	0,2298
100	157,4638	4,6624	0,0296	139,7497	4,8195	0,0347	86,5238	5,1276	0,0819
200	483,8828	6,6737	0,0138	426,865	6,9116	0,0162	256,954	7,7589	0,0405

В Таблице 6 в качестве примера представлены средние значения показателей $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ и R_1 для графов разных размеров N , и вероятностей p для случая, когда происходит перемещение узлов.

Таблица 6 – Статистические показатели структурной надежности сети при разрушении узлов с восстановлением топологии (с перемещением узлов)

Table 6 – Statistical indicators of network structural reliability under node failures with topology recovery (with node relocation)

	ПРОИСХОДИТ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ УЗЛОВ								
	Итерация 3			Итерация 5			Итерация 10		
Размер/ p	Ξ_2	Ξ_1	R_2	Ξ_2	Ξ_1	R_2	Ξ_2	Ξ_1	R_2
$p = 0,3$									
40	40,419	2,9495	0,073	40,3815	2,9471	0,073	40,3432	2,9484	0,0731
100	182,1809	4,5898	0,0252	181,9855	4,59	0,0252	181,8979	4,5972	0,0253
200	561,9159	6,5888	0,0117	561,7465	6,5903	0,0117	562,2081	6,5886	0,0117
$p = 0,5$									
40	40,3655	2,9485	0,0731	40,3993	2,9467	0,073	40,4065	2,9452	0,0729
100	181,9719	4,5915	0,0252	181,8743	4,5911	0,0253	182,0178	4,5948	0,0253
200	561,9329	6,5869	0,0117	561,881	6,5877	0,0117	561,9727	6,5873	0,0117
$p = 0,8$									
40	40,475	2,9465	0,0729	40,4246	2,9441	0,0729	40,3655	2,9455	0,073
100	181,8331	4,5943	0,0253	182,0754	4,5912	0,0252	181,8734	4,5939	0,0253
200	561,9348	6,5893	0,0117	561,9686	6,5868	0,0117	561,9307	6,5879	0,0117

Заключение

Получен ряд дескриптивных математико-статистических моделей, характеризующих последствия разрушения коммуникационных каналов и уничтожения узлов мобильных групп киберфизических систем. Методом имитационного моделирования выполнено исследование влияния разрушения ребер в случайном графе на связность сети в зависимости от показателя – доли разрушенных узлов графа. Установлено, что среднее значение показателя практически не зависит от исходного числа узлов сети, при том, что имеется обратная зависимость между значениями показателя устойчивости – доли удаленных ребер, результатом чего является потеря связности, от числа узлов графа. Показано, что оценивание доверительных границ, в которых лежит доля разрушенных ребер, приводящее к потере связности графа, может быть выполнено с использованием нормального закона распределения случайной величины.

Результаты моделирования последствий деструктивных воздействий при разных подходах к реагированию на разрушение узлов, позволяют заключить, что использование такого ресурса мобильных групп киберфизических систем как способность устройств перемещаться, является способом парирования деструктивных воздействий. За счет перемещения узлов обеспечивается повышение устойчивости структурных показателей структурной надежности – сложности структуры и неравномерности распределения нагрузки между узлами сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Сурма И.В., Анненков В.И., Карпов В.В., Моисеев А.В. «Сетецентрическое управление»: современная парадигма развития систем управления в вооруженных силах ведущих держав мира. *Национальная безопасность / Nota Bene*. 2014;(2):317–327.

2. Шубинский И.Б. *Структурная надежность информационных систем. Методы анализа*. Москва: Журнал Надежность; 2012. 216 с.
3. Липаев В.В. *Функциональная безопасность программных средств. Серия «Управление качеством»*. Москва: СИНТЕГ; 2004. 348 с.
Lipaev V.V. *Functional Security of Software Systems. Series "Quality Management"*. Moscow: SYNTEG; 2004. 348 p. (In Russ.).
4. Белоглазов Д.А., Гайдук А.Р., Косенко Е.Ю. и др. *Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах*. Москва: Физматлит; 2015. 305 с.
5. Макаренко С.И. *Противодействие беспилотным летательным аппаратам*. Санкт-Петербург: Научные технологии; 2020. 204 с.
6. Valdez L.D., Di Muro M.A., Braunstein L.A. Failure-Recovery Model with Competition Between Failures in Complex Networks: A Dynamical Approach. *Journal of Statistical Mechanics Theory and Experiment*. 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.03494>
7. Боровик В.С., Гуцул В.И., Клестов С.А. и др. *Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения*. Томск: STT; 2018. 140 с.
8. Тимофеев А.В. *Адаптивное управление и интеллектуальный анализ информационных потоков в компьютерных сетях*. Санкт-Петербург: Анатолия; 2012. 280 с.
9. Siganos G., Faloutsos M., Faloutsos P., Faloutsos C. Power Laws and the AS-Level Internet Topology. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2003;11(4):514–524. <https://doi.org/10.1109/TNET.2003.815300>
10. Довгаль В.А. Интеграция сетей и вычислений для построения системы управления роением дронов как сетевой системы управления. *Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки*. 2022;(1):62–76.
Dovgal V.A. Integration of Networks and Computing to Build a Drone Swarm Management System as a Network Management System. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*. 2022;(1):62–76. (In Russ.).
11. Кондрашов С.А. Критерии оценки качества передачи данных в самоорганизующихся сетях. *Ученые записки ТОГУ*. 2014;5(3):10–15.
Kondrashov S.A. Criteria for Assessing the Quality of Data in Self-Organizing Networks. *Uchenye zapiski TOGU*. 2014;5(3):10–15. (In Russ.).
12. Loo J., Mauri J.L., Ortiz J.H. *Mobile Ad Hoc Networks. Current Status and Future Trends*. Boca Raton: CRC Press; 2012. 538 p. <https://doi.org/10.1201/b11447>
13. Gvozdev V., Guzairov M., Bezhaeva O., Davlieva A., Galimov R. Ensuring the Functional Safety of the Distributed Dynamic Systems Components in the Conditions of Uncertainty of the Environment Use. In: *2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 27–30 October 2020, Ufa, Russia. IEEE; 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICOECS50468.2020.9278464>
14. Карпов В.Э. Управление в статических роях. Постановка задачи. В сборнике: *Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: сборник научных трудов VII-й Международной научно-практической конференции: Том 2, 20–22 мая 2013 года, Коломна, Россия*. Москва: Физматлит; 2013. С. 730–739.
15. Li W., Bashan A., Buldyrev S.V., Stanley H.E., Havlin Sh. Cascading Failures in Interdependent Lattice Networks: The Critical Role of the Length of Dependency Links. *Physical Review Letters*. 2012;108. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.228702>

16. Wang J., Lao S., Ruan Yi., Bai L., Hou L. Research on the Robustness of Interdependent Networks Under Localized Attack. *Applied Sciences*. 2017;7(6). <https://doi.org/10.3390/app7060597>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гвоздев Владимир Ефимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической кибернетики Уфимского университета науки и технологий, Уфа, Российская Федерация.

e-mail: wega55@mail.ru

ORCID: [0009-0004-8557-3445](https://orcid.org/0009-0004-8557-3445)

Vladimir E. Gvozdev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Technical cybernetics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation.

Гузайров Мурат Бакеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления информационной безопасностью Уфимского университета науки и технологий, Уфа, Российская Федерация.

e-mail: guzairovmb@uust.ru

Murat B. Guzairov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Security Management, Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation.

Ракипова Алия Салаватовна, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики Уфимского университета науки и технологий, Уфа, Российская Федерация.

e-mail: aliyasr21@gmail.com

ORCID: [0000-0002-7548-2134](https://orcid.org/0000-0002-7548-2134)

Aliya S. Rakipova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Technical cybernetics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation.

Галимов Роберт Ришатович, и. о. генерального директора федерального казенного предприятия «Авангард», Стерлитамак, Российская Федерация.

e-mail: rrgalimov@gmail.com

Robert R. Galimov, Acting General Director of the Federal State Enterprise "Avangard", Sterlitamak, the Russian Federation.

Янчиев Данила Викторович, студент кафедры технической кибернетики Уфимского университета науки и технологий, Уфа, Российская Федерация.

e-mail: danilayanchiev@yandex.ru

Danila V. Yanchiev, Student, Department of Technical Cybernetics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 09.06.2025; одобрена после рецензирования 11.08.2025; принята к публикации 15.08.2025.

The article was submitted 09.06.2025; approved after reviewing 11.08.2025; accepted for publication 15.08.2025.