

Методологические аспекты информационных и математических технологий

УДК 004.052.2

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.001

Исследование каскадных отказов в системах сетей на основе модели «Дом качества»

Гвоздев Владимир Ефимович¹, Бежаева Оксана Яковлевна¹, Ракипова Алия Салаватовна¹, Ракипов Радик Ралифович², Приходько Владимир Евгеньевич³, Тепляшин Павел Николаевич³

¹Уфимский университет науки и технологий, Россия, Уфа, *RakipovaAS@uust.ru*

²МЧС России, Россия, Москва

³НИИ «Солитон», Россия, Уфа

Аннотация. В работе рассматривается использование известной модели «Дом качества» (House of Quality – HoQ) как шаблона для структурного моделирования каскадных отказов, возникающих во взаимодействующих сетях. Использование HoQ делает возможным моделировать не только внезапные, но и постепенные отказы в системе сетей. Отличительной особенностью модели HoQ является то, что её использование позволяет не только формализовать процедуру построения каскада отказов, но и выделить динамически возникающие и исчезающие контуры, в состав которых могут входить компоненты как одной и той же, так и разных сетей.

Ключевые слова: система сетей, эмерджентность, Дом качества (HoQ), надежность, каскадные отказы, динамические возникающие и исчезающие циклы

Цитирование: Гвоздев В.Е. Исследование каскадных отказов в системах сетей на основе модели «дом качества» / В.Е. Гвоздев, О.Я. Бежаева, А.С. Ракипова, Р.Р. Ракипов, В.Е. Приходько, П.Н. Тепляшин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 4(40). – С. 5-16. – DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.001.

Введение. Отличительным признаком постиндустриальной эпохи является господство сетевых систем во всех сферах жизни общества. В [1] подчеркивается, что в настоящее время критически важной методологической проблемой является изучение эмерджентных явлений, обусловленных взаимопроникновением сетей разной природы. К числу таких проявлений относится снижение функциональной надежности сетей, обусловленное их объединением [2].

Тот факт, что окружающая нас действительность является системой сетей, т.е. совокупностью взаимодействующих сетей, функционирование которых зависит от сведений, получаемых из единого информационного пространства, качественно изменяет содержание задач управления. Возникло понятие сетецентрического управления, что является стимулом развития теоретических основ исследований сетевых систем. Например, в [3] представлена трехкомпонентная модель системы сетецентрического управления, представляющая собою колониальное образование сетей (именуемых «решетками»), а именно:

- системы получения информации о ситуации, в которой пребывают объекты и субъекты управления (сенсорная решетка);
- системы, предназначенные для комплексного анализа ситуаций на основе разнородной информации, поступающей от разных источников, поддержки принятия управленческих решений и передачи их в информационные системы исполнительных устройств (информационная решетка);
- системы гетерогенных киберфизических устройств, предназначенных для скоординированной деятельности в рамках заданий, полученных из информационной решетки (исполнительная решетка).

Анализ литературных источников позволяет сделать следующие заключения о современном состоянии исследований в области моделирования каскадных отказов. К числу основополагающих работ в области моделирования, на которую ссылаются во многих других работах, является [4]. Во многих работах объектами исследования являются два вида сетей: искусственные сети, такие как Watts-Strogatz (WS), Erdős-Rényi (Эрдеша-Реньи – ER), случайные регулярные (Random Regular – RR), Барабаши-Альберт (Barabási-Albert – BA), решетчатые сети [5-8], а также физически существующие сети, такие, как электрические сети, сети водоснабжения, Интернет [9] и др. Общепринятая исследовательская парадигма моделирования каскадных отказов заключается в построении взаимозависимых сетей с различными схемами взаимодействия подсетей и анализе различных топологических характеристик и особенностей связей: силы связи, характеристики устойчивости и направления связей, особенности деструктивных воздействий на характер каскадных отказов [8,10-14]. Характер деструктивного воздействия определяется подходом к выбору характера атаки: случайная атака (Random attack – RA), целенаправленная атака (targeted attack – TA) [12-15] и локализованная атака (localized attack – LA) [16-20].

В зависимости от фокуса, существующие исследования можно разделить на два класса: первый связан с изучением влияния топологии отдельных сетей на сценарии потока отказов; другой заключается в анализе влияния зависимостей между отдельными сетями на надежность системы сетей. Помимо упомянутых направлений, известны модели каскадных отказов, обусловленных перегрузкой узлов и каналов вследствие деструктивных воздействий разной природы, включая целенаправленные атаки [12, 21]. Известны исследования, направленные на изучение возможностей восстановления взаимозависимых сетей после разрушений [21-23]. В большинстве исследований системы сетей исходят из случайной природы отказов компонентов сетей, либо их злонамеренного уничтожения. При этом гораздо меньше исследований посвящено моделированию каскадов отказов, вызванных стихийными бедствиями [24]. Особенностью деструктивных воздействий этого типа является то, что компоненты инфраструктурных сетей жизнеобеспечения при таких воздействиях разрушаются лишь с некоторой вероятностью.

В литературных источниках отмечается, что известные положения теории надежности, ориентированные на обеспечение функциональной надежности технических систем, не покрывают всех задач, связанных с обеспечением функциональной надежности сетевых систем. Необходимость разработки новых и совершенствования известных в теории надежности подходов, методов и моделей обусловлена, с одной стороны, актуальностью задач повышения эффективности и результативности решения задач сетецентрического управления; с другой, критической важностью обеспечения функциональной надежности взаимодействующих сетей, с третьей – потребностью развития теоретических основ обеспечения функциональной надежности многоуровневых многослойных систем.

Настоящая работа посвящена рассмотрению использования известной модели «Дом качества» (House of Quality – HoQ) [25], являющейся фокусом известной концепции поэтапного развития качества (Quality Function Deployment), как основы моделирования каскадов отказов. Её использование позволяет моделировать сценарии развития каскадных отказов при инициирующих воздействиях, оказываемых на различные компоненты взаимосвязанных сетей, а также выделять динамически возникающие и исчезающие контуры. Предлагаемый подход относится к упомянутому ранее направлению, связанному с исследованием влияния структуры сетей и особенностей их взаимосвязей на структурную надежность системы сетей.

1. Концептуальная основа исследований. Концептуальную основу моделирования каскадов отказов во взаимодействующих сетях составляет учет следующих свойств:

1) рассмотрение динамических взаимодействующих сетей, как «системы систем» [1], для которой типичным является возникновение различных неожиданных, в том числе нежелательных, ситуаций (в [26] отмечается наличие у сложных систем такого свойства, как «normal accident»). В [23, 27-32] введено понятие «сети сетей» («network of networks – NON); в упомянутых источниках представлены результаты исследований процессов перколяции цепочечных, звездообразных и древовидных NON аналитическими и численными методами; отмеченное обстоятельство обосновывает использование различных методов моделирования свойств, как основы разноаспектного исследования свойств системы систем; выявленные в результате моделирования свойства объектов управления составляют основу проактивного управления;

2) членимость и целостность системы систем как объектов моделирования – это предполагает при проведении исследований свойств «системы систем» выделение отдельных совокупностей взаимодействующих систем, каждой из которых, в зависимости от цели исследования, могут быть поставлены в соответствие свои модели; при этом совместное использование этих моделей создает основу для выявления эмерджентных свойств системы систем (как желательных, так и нежелательных) [26]; примером реализации этого свойства является моделирование каскадов, как в изолированных, так и во взаимодействующих сетях;

3) ситуативный подход, в рамках которого одной и той же системе, в зависимости от характера инициирующих событий, может быть поставлено в соответствие множество сценариев каскадов отказов [33], содержание которых, во-первых, зависит от характера (природы) инициирующего события, и, во-вторых, от того, на какой узел сети было оказано инициирующее воздействие; примером реализации ситуативного подхода является понятие «основное направление связи» [34], содержание которого может изменяться в зависимости от изменяющихся целей управления, которые, в свою очередь, определяются изменениями ситуаций в зоне ответственности субъекта управления.

2. Структурные модели взаимодействующих сетей. Сложным системам, в зависимости от уровня абстракции при изучении объекта и целей моделирования, может быть поставлено в соответствие множество моделей, поэтому для одной и той же системы, в зависимости от выбранной точки зрения на объект моделирования, можно поставить в соответствие различные структурные модели, различающиеся по степени детализации представления компонентов системы. Для получения сопоставимых структурных моделей необходимо определить единообразный подход к их построению.

В системе систем каждой из выделенных граней ставятся в соответствие цель управления и связанная с этим ситуация. Считаем, что для ситуации характерно следующее:

а) наличие структуры фактов; под фактами понимаются сущности (объекты, процессы, явления), а также отношения и связи между ними;

б) ситуациям, соответствующим разным системам в составе системы систем, можно поставить в соответствие множество структур (что соответствует известному принципу полиморфизма в описании систем); вид структур определяется точкой зрения на систему;

в) ситуация характеризуется множеством качественных и количественных признаков, т.е. компоненты структур могут описываться параметрами, которым ставятся в соответствие разные шкалы.

г) ситуация рассматривается как сущность, изменяющаяся во времени.

В рамках выделенных свойств ситуациям можно поставить в соответствие систему сетей, структура которых изменяется во времени. Связи между узлами описываются параметрами, которым ставятся в соответствие разные шкалы.

Формально проблемная ситуация (содержание этого понятия раскрывается, например, в [35]), соответствующая системе систем, может рассматриваться, как совокупность взаимосвязанных сетей. Урегулирование ситуации в рамках выделенной точки зрения на систему предполагает достижение цели в условиях ограничений на управляющие решения и действия. Описание системы систем посредством ситуаций создает основу для сбалансированного подхода к урегулированию проблемной ситуации в целом так, чтобы достижение целей в рамках одной из взаимодействующих систем не приводило к ухудшению ситуаций в других системах.

Для иллюстрации приведем следующий пример, в котором устанавливается связь бизнес-процессов и системы информационной поддержки управления бизнес-процессами в рамках методологии MDA (Model Driven Architecture) [36]. Пусть каждой грани системы систем соответствует организация, которая реализует бизнес-процессы. Реализация каждого бизнес-процесса обеспечивается информационной системой организации. Возможность реализации информационных сервисов в слое баз данных и приложений обеспечивается физической инфраструктурой информационной системы (хосты; переключатели; маршрутизаторы; сервера; каналы и т.д.). Каждому слою ставится в соответствие своя сеть. Таким образом, имеются взаимодействующие сети, имеющих свои локальные цели управления. В целом, грани системы систем ставится в соответствие многослойная совокупность взаимодействующих структур: «физическая инфраструктура информационной системы – структура взаимодействующих информационных сервисов – структура бизнес-процессов».

Факторами, определяющими ситуации, помимо объективных и субъективных свойств фактов, являются характеристики путей и контуров как внутри отдельных сетей, так и между сетями. Взаимозависимость ситуаций, соответствующих разным системам, проявляются в том, что действия, предпринимаемые для урегулирования ситуаций в одной из систем, могут инициировать события (в том числе с нежелательными последствиями) в других системах.

На основании изложенного можно заключить, что для изучения ситуаций и взаимозависимостей между ними в разных системах необходимо, с одной стороны, использовать систему гетерогенных моделей (полиморфизм моделей). С другой стороны, для получения сопоставимых оценок при изучении свойств систем, соответствующих разным граням, следует использовать однотипные подходы и методы (изоморфизм моделей).

В рамках высказанных соображений для исследования структуры каскадов отказов в паре взаимодействующих сетей представляется целесообразным использовать известную рамочную конструкцию, именуемую «Дом качества» (англ. – House of Quality – HoQ) [25], которая представлена на рис. 1. Выбор обусловлен тем, что в рамках HoQ представляется возможность выделять не только пути и циклы в отдельных сетях, но и между взаимодействующими сетями. Это создает основу для выявления как желательных, так и нежелательных эмерджентных свойств сложных систем [37], а также, на наш взгляд, создает предпосылки в будущем для адаптации аппарата системных архетипов [38] в области исследования каскадов отказов. На рис. 1 для иллюстрации приведен пример представления взаимодействующих графов в виде HoQ. Заметим, что HoQ представляет шаблон для описания структур взаимодействующих сетей, инвариантный к виду структур. Представление компонентов («крыша», «веранда» HoQ) в случаях ориентированных и смешанных графов посредством треугольных матриц описано в [39].

Ограничением предлагаемой модели является то, что она ориентирована на исследование пары взаимодействующих сетей. Ребрам графов, представляемым посредством матриц, в зависимости от содержания связей, могут ставиться в соответствие характеристики, измеряемые в разных шкалах.

3. Пример моделирования динамики каскада отказов во взаимодействующих сетях.

Одной из задач, создающих основу для целенаправленной деятельности по урегулированию проблемных ситуаций, является получение прогнозных оценок динамики изменения ситуаций во взаимодействующих сетях при тех либо иных инициирующих воздействиях [33].

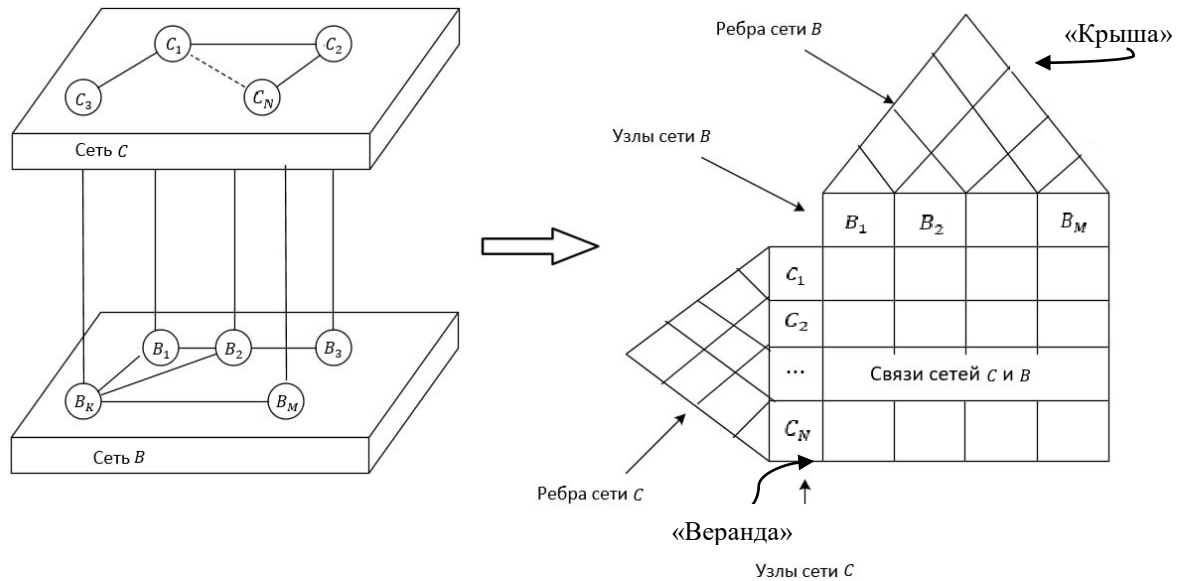


Рис. 1. Представление взаимодействующих сетей посредством НоQ

Рассмотрим пример качественного моделирования динамики каскада во взаимодействующих сетях с использованием модели НоQ. Целью примера является, во-первых, демонстрация того, что использование модели НоQ делает возможным фиксировать различия в изменении состояний узлов графов во времени; во-вторых, того, что можно одновременно оценивать изменения состояний узлов, принадлежащих разным графам; в-третьих, того, что использование НоQ позволяет выделять динамически возникающие и исчезающие циклы.

Пусть взаимодействующие сети имеют вид, представленный на рис. 2. Для упрощения различимости узлов разных сетей системы при разработке сценария, узлы сети Ф будем обозначать квадратами; узлы сети К – кружками (в [40] подчеркивается, что построение топологий взаимодействующих сетей предполагает содержательный анализ объекта моделирования). Взаимодействующим графам ставится в соответствие НоQ, представленный на том же рисунке. Входящие ребра графа в модели НоQ в случае ориентированных графов представлены единицами над разделительными линиями клеток матрицы; исходящие стрелки – единицами, расположенными ниже разделительных линий. В случае неориентированных ребер нули либо единицы ставятся как выше, так и ниже разделительных линий.

Предположим, что во взаимодействующих сетях имеет место процесс, которому ставится в соответствие системный архетип «эскалация» [37], причем инициирующее воздействие оказано на узел Φ_2 . Содержательным примером такого процесса может быть постепенное истощение ресурсов в узлах взаимодействующих сетей электроснабжения и водоснабжения [40].

При описании процесса время выражается тактами (интервалами времени между регистрируемыми состояниями узлов). Также предполагается, что каждому из узлов ставится в соответствие некоторый ресурс, который до начала развития каскада у всех узлов равен единице. Изменение (деградация) ресурса во всех узлах определяется по правилу

$$Q_i^{(m)} = Q_{i-1}^{(m-1)} - \sum_l Q_{i-1}^{(l)} (1 - \beta), \quad l \neq m,$$

где $Q_i^m(t)$ – характеристика ресурсов m -го узла на i -м шаге;

$Q_{i-1}^{(l)}$ – характеристики ресурсов l -х узлов на $(i - 1)$ -м шаге, которые оказывают влияние на состояние m -го узла. Выходящие ребра l -х узлов являются входящими ребрами m -го узла;
 β – коэффициент, при вычислении принимавшийся равным $\beta = 0.25$.

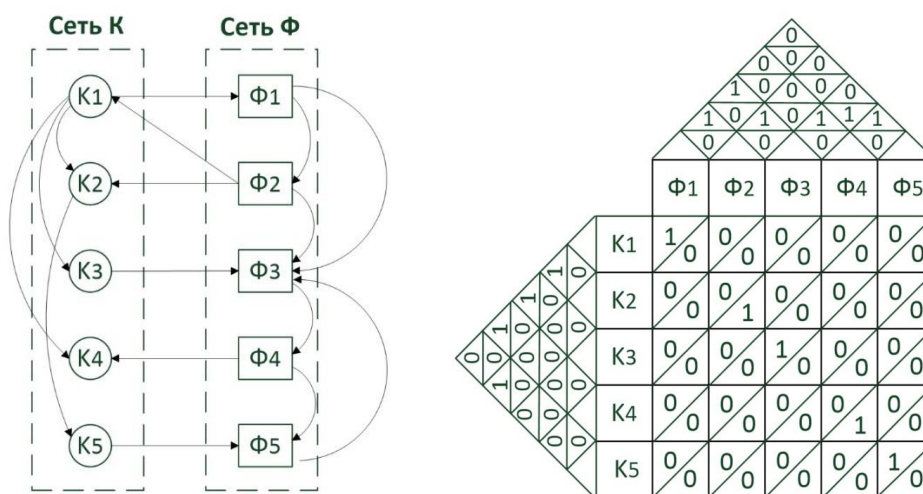


Рис. 2. Представление взаимодействующих сетей посредством НоQ

На рис. 3 представлены семь тактов каскада отказов.

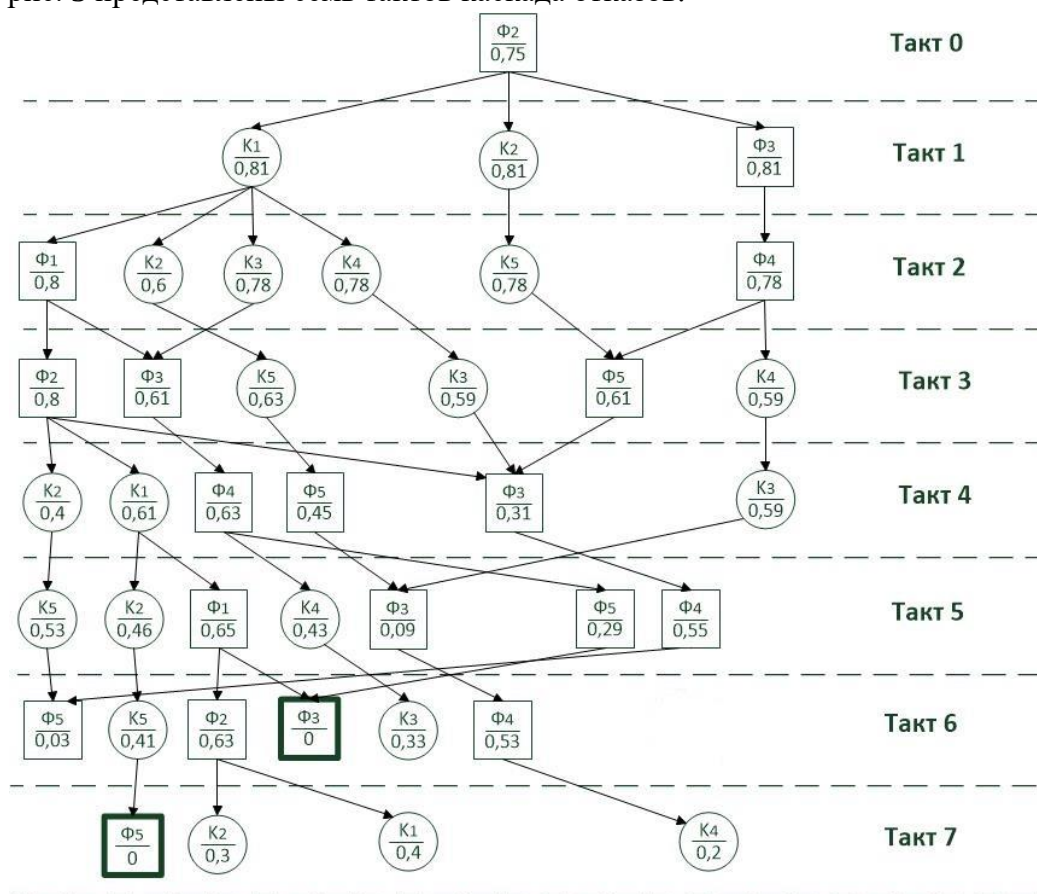


Рис. 3. Динамика изменения состояния узлов взаимодействующих сетей

В верхних частях квадратов/кружков указываются имена узлов графов. Ниже линий – объемы ресурсов, которыми обладают узлы. Жирным на рис. 3 выделено прекращение функционирования узлов $\Phi 3$ и $\Phi 5$ из-за отсутствия ресурсов.

В рассматриваемом примере каскад постепенных отказов из-за уменьшения ресурсов узлов графа делает возможным выделить динамически возникающие и исчезающие циклы между узлами графа. Например, для узла $\Phi 3$ выделяются следующие циклы:

Ф3-> Ф4-> Ф5-> Ф3

Цикл возникает на третьем такте. Время существования цикла – три такта. Заканчивается на шестом такте.

Ф3-> Ф4-> К4-> К3-> Ф3

Цикл возникает на первом такте. Время существования цикла – четыре такта. Заканчивается на пятом такте.

Ф3-> Ф4-> Ф5-> Ф3

Цикл возникает на первом такте. Время существования цикла – три такта. Заканчивается на четвертом такте.

Таким образом, использование НоQ в качестве шаблона для описания взаимодействующих графов делает возможным выявлять динамические возникающие и исчезающие циклы в каскадах отказов. При этом в состав циклов могут входить узлы, входящие в состав как разных сетей, так и одной сети. Следует подчеркнуть, что отличительной особенностью построения каскада отказов на основе НоQ является то, что возможно выделять не только пути и циклы, но и время возникновения и исчезновения циклов.

В таблице 1 представлены значения ресурсов в разных узлах взаимодействующих графов, соответствующие разным тактам каскада. Заштрихованные клетки таблицы обозначают отказ узлов сети из-за исчерпания ресурсов, либо вследствие того, что узлы становятся поглощающими (потеря функциональности узла по причине отказа типа «отсутствие связности» [41]).

Таблица 1. Значения ресурсов

№ такта	Слой Ф					Слой К				
	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	К1	К2	К3	К4	К5
1	1	1	0.81	1	1	0.81	0.81	1	1	1
2	0.8	1	0.81	0.78	1	0.81	0.6	0.78	0.78	0.78
3	0.8	0.8	0.61	0.78	0.61	0.81	0.6	0.59	0.78	0.63
4	0.8	0.8	0.31	0.63	0.45	0.61	0.4	0.59	0.78	0.63
5	0.65	0.8	0.09	0.55	0.29	0.61	0.46	0.59	0.43	0.53
6	0.65	0.63		0.53	0.03	0.61	0.46	0.33	0.43	0.41
7	0.65	0.63		0.53		0.4	0.3	0.33	0.2	0.41

На рис. 4-5 представлены графики изменения ресурсов узлов, принадлежащих разным сетям, во времени. Эти данные могут служить основой для построения обобщенных показателей надежности на основе аппарата статистических индексов методами, предложенными в работе [42].

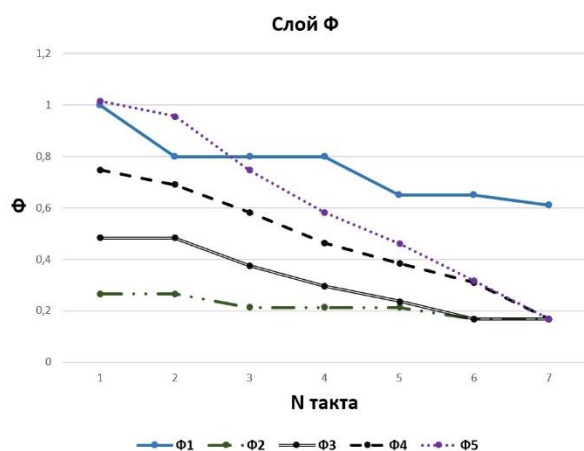


Рис. 4. График изменения ресурсов узлов слоя Ф

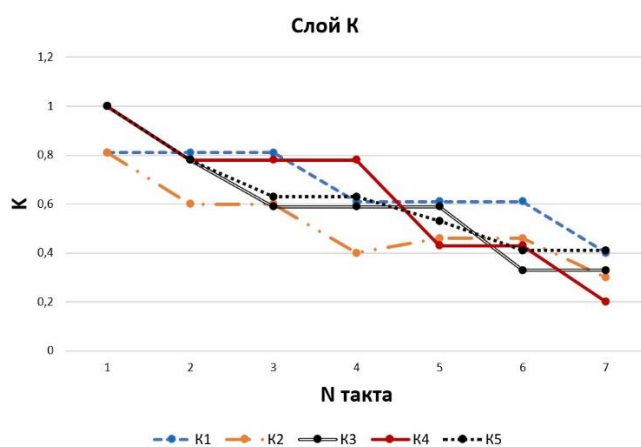


Рис. 5. График изменения ресурсов узлов слоя К

Закключение. В качестве подхода для построения сопоставимых структурных моделей системы сетей, соответствующих разному видению объектов моделирования, предложено

использовать ситуационный подход. Такой подход создает основу для выработки сбалансированного подхода к урегулированию проблемных ситуаций, соответствующих разным граням сложной системы.

Для структурного моделирования каскадных отказов в паре взаимодействующих сетей предложено использовать известную модель НоQ. Целесообразность использования этой модели применительно к задаче моделирования каскадных отказов подтверждается тем, что имеется возможность моделировать не только внезапные, но и постепенные отказы узлов сети, обусловленные истощением ресурсов узлов. Отличительной особенностью использования модели НоQ является то, что она не только позволяет формализовать процедуру построения каскада отказов, но и делает возможным выделение динамически возникающих и исчезающих циклов, в состав которых могут входить компоненты как одной и той же, так и разных сетей.

Список источников

1. Дугин А. «Сетевые войны». Аналитический доклад Александра Дугина при участии Валерия Коровина и Александра Бовдунова / А. Дугин // Сети, когнитивная наука, управление сложностью, 2014. – URL: <https://spkurdyumov.ru/networks/setevye-vojny/>.
2. Lee K., Lee H.-W., Modiano E. Reliability in layered networks with random link failures. Proceedings of the 29th Conference on Information communications, ACM transactions on networking, 2010, vol. 19, no. 6, 10 p.
3. Сурма И.В. «Сетецентрическое управление»: современная парадигма развития систем управления в вооруженных силах ведущих держав мира / И.В. Сурма, В.И. Анненков, В.В. Карпов, А.В. Моисеев // Национальная безопасность. 2014. – № 2(31). – 11с. – DOI: 10.7256/2073–8560.2014.2.11393.
4. Buldyrev S.V., Parshani R., Paul G., et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. Nature, 2010, vol. 464, 4 p., DOI: 10.1038/nature08932
5. Martin-Hernandez J., Wang H., Van Mieghem P., et al. Algebraic connectivity of interdependent networks. Physica A, 2014, vol. 404, pp. 92-105.
6. Bashan A., Berezin Y., Buldyrev S.V., et al. The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks. Nature Physics, 2013, vol. 9, pp. 667-672.
7. Li W., Bashan A., Buldyrev S.V., Stanley H.E., et al. Cascading failures in interdependent lattice networks: The critical role of the length of dependency links. Physical review letters, 2012, vol. 108, 228702, DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.228702.
8. Buldyrev S.V., Shere N.W., Cwiliich G.A. Interdependent networks with identical degrees of mutually dependent nodes. Physical Review E, 2011, vol. 83, 016112, DOI: 10.1103/PhysRevE.83.016112.
9. Wang S., Hong L., Ouyang M., et al. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies. Safety science, 2013, no. 51, pp. 328-337.
10. Valdez L.D., Macri P.A., Stanley H.E., et al. Triple point in correlated interdependent networks. Physical review E, 2013, vol. 88, 050803, DOI: 10.1103/PhysRevE.88.050803.
11. Wang J., Jiang C., Qian J. Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures. Physica A, 2014, vol. 393, pp. 535-541.
12. Chen Z., Du W.-B., Cao X.-B., et al. Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack. Chaos, solitons & fractals, 2015, no. 80, pp. 7-12.
13. Tan F., Xia Y., Wei Z. Robust-yet-fragile nature of interdependent networks. Physical review E, 2015, vol. 91, 052809, DOI: 10.1103/PhysRevE.91.052809
14. Jun T., Piera M.A., Ruiz S. A causal model to explore the ACAS induced collisions. Journal of aerospace engineering, 2014, vol. 228, no. 10, pp. 1735-1748.
15. Du R., Dong G., Tian L., et al. Targeted attack on networks coupled by connectivity and dependency links. Physica A, 2016, vol. 450, pp. 687-699.
16. Berezin Y., Bashan A., Danziger M.M., et al. Localized attacks on spatially embedded networks with dependencies. Scientific reports, 2015, vol. 5, 8934. DOI: 10.1038/srep08934.
17. Shao S., Huang X., Stanley H.E., et al. Percolation of localized attack on complex networks. New journal of physics, 2015, vol. 17, 023049. DOI: 10.1088/1367-2630/17/2/023049.
18. Wu B., Tang A., Wu J. Modeling cascading failures in interdependent infrastructures under terrorist attacks. Reliability engineering & system safety, 2016, no. 147, pp. 1-8.
19. Dong G., Hao H., Du R., et al. attack on clustering networks. New Journal of Physics, 2019, vol. 21, no. 1. DOI: 10.1088/1367-2630/aaf773.
20. Yuan X., Dai Y., Stanley H.E., Havlin S. K-core percolation on complex networks: Comparing random, localized, and targeted attacks. Physical Review E, 2016, vol. 93, 062302. DOI: 10.1103/PhysRevE.93.062302.

21. Qiu Y. Optimal weighting scheme and the role of coupling strength against load failures in degree-based weighted interdependent networks. *Physica A*, 2013, vol. 392, pp. 1920-1924.
22. Stippinger M., Kertesz J. Enhancing resilience of interdependent networks by healing. *Physica A*, 2014, vol. 416, pp. 481-487.
23. Hong S., Lv C., Zhao T., et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network. *Physica A*, 2016, vol. 49, pp. 1-11.
24. Dong G., Hao H., Du R., et al. Localized attack on clustering networks. *arXiv*, 2016, DOI: 10.48550/arXiv.1610.04759.
25. Quality Function Deployment (QFD): Key Components of QFD. January 9, 2024, available at: <https://bgmcgroup.com/quality-function-deployment-qfd-key-components-of-qfd/> (accessed:01/20/2024).
26. Holland O.T. Taxonomy for the modeling and simulation of emergent behavior systems. *Proceedings of spring simulation multiconference "Society for Computer Simulation International"*, 2007, vol. 2, pp. 102-109, DOI: 10.1145/1404680.1404684.
27. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a tree-like network of interdependent networks. *arXiv*, 2011. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.066134.
28. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a network of networks. *Physical Review Letters*, 2011, vol. 107, 193903. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.195701.
29. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a network formed by n interdependent networks with a one-to-one correspondence of dependent nodes. *Physical Review E*, 2012, vol. 85, 066134. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.066134.
30. Gaogao D., Ruijin D., Lixin T., et al. Robustness of network of networks with interdependent and interconnected links. *Physica A*, 2013, vol. 424, pp. 11-18.
31. Dong G., Gao J., Du R., Tian L., et al. Robustness of network of networks under targeted attack. *Physical Review E*, 2013, vol. 87, 052804. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.052804.
32. Dong G., Tian L., Zhou D., et al. Robustness of n interdependent networks with partial support-dependence relationship. *Europhysics Letters*, 2013, vol. 102, no. 6. DOI: 10.1209/0295-5075/102/68004.
33. Kaplan S., Zlotin B., Visnepolschi S., Zusman A. New tools for failure and risk analysis: an introduction to anticipatory failure determination (AFD) and the theory of scenario structuring. *Ideation International Incorporated*, 1999, 83 p.
34. ГОСТ Р 53111 – 2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки, 2009. – 19 с.
35. Виттих В.А. Введение в теорию интерсубъективного управления / В.А. Виттих. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – 64 с.
36. Brown A.W. Model driven architecture: principles and practice. *Software and Systems Modeling*, 2004, vol. 3, pp. 314-327. DOI: 10.1007/s10270-004-0061-2.
37. Braun W. The system archetypes. Copyright, 2002, 26 p.
38. Гвоздев В.Е. Анализ влияния качества управления проектом на состояние функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов на основе системного архетипа «предел роста» / В.Е. Гвоздев, М.Б. Гузаиров, О.Я. Бежаева // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 2021. – Т. 9(3). – С. 1-15. – DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.026.
39. Гвоздев В.Е. Анализ структурной надежности многослойных взаимодействующих сетей передачи данных / В.Е. Гвоздев, О.Я. Бежаева, А.С. Ракипова, и др. // *Всерос. Научная конференция «Опыт и перспективы совершенствования систем связи и акустических испытаний современной техники»*, г. Санкт-Петербург, 2025.
40. Dunn S., Holmes M., Wilkinson S. Modelling interdependent cascading failures in real world complex networks using a functional dependency model. *Resilience and Reliability of Infrastructures*, 2024, 6 p., available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/29416083.pdf>
41. Николаев В.И. Системотехника: методы и приложения / В.И. Николаев, В.М. Брук. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
42. Гаскаров Д.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Д.В. Гаскаров, Т.А. Голинкевич, А.В. Мозгалеvский. – М.: «Советское радио», 1974. – 224 с.

Гвоздев Владимир Ефимович. Д.т.н., профессор, профессор кафедры технической кибернетики Уфимского университета науки и технологий. AuthorID: 174520, SPIN: 7043-9040, ORCID: 0009-0004-8557-3445, Scopus AuthorID: 7101700484, wega55@mail.ru. 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Бежаева Оксана Яковлевна. К.т.н., доцент, заведующий кафедрой технической кибернетики Уфимского университета науки и технологий. AuthorID: 271220, SPIN: 9785-3875, ORCID: 0000-0002-3373-7266, Scopus AuthorID: 57216845244, obezhaeva@gmail.com. 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Ракипова Алия Салаватовна. К.т.н., доцент кафедры технической кибернетики Уфимского университета науки и технологий. AuthorID: 869995, SPIN: 3553-4512, ORCID: 0000-0002-7548-2134, Scopus AuthorID: 57200183868, RakipovaAS@uust.ru, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Ракипов Радик Ралифович. Начальник отдела Департамента тылового и технического обеспечения МЧС России. AuthorID: 1288037, SPIN: 8024-1941, radikrakipovnsav@mail.ru, 121357, г. Москва, ул. Ватутина, 1.

Приходько Владимир Евгеньевич. Заместитель генерального директора по исследованиям и разработкам НИИ «Солитон». AuthorID: 1311599, SPIN: 5561-6677, v.prihodko@soliton.com.ru, 450080, г. Уфа, ул. С. Злобина, 31.

Тепляшин Павел Николаевич. Начальник отдела вычислительной техники и программирования НИИ «Солитон». AuthorID: 1310228, SPIN: 7724-6529, tepik@soliton.com.ru, 450080, г. Уфа, ул. С. Злобина, 31.

UDC 004.052.2

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.001

Study of cascading failures in network systems based on the “House of quality” model

Vladimir E. Gvozdev¹, Oxana Y. Bezhaeva¹, Aliya S. Rakipova¹, Radik R. Rakipov², Vladimir E. Prikhodko³, Pavel N. Teplyashin³

¹Ufa university of science and technology, Russia, Ufa, RakipovaAS@uust.ru

²EMERCOM of Russia, Russia, Moscow

³Research institute «Soliton», Russia, Ufa

Abstract. The paper considers the use of the well-known House of Quality (HoQ) model as a template for structural modeling of cascade failures occurring in interacting networks. The use of HoQ makes it possible to model not only sudden, but also gradual failures in a network system. A distinctive feature of the HoQ model is that its use allows not only to formalize the procedure for constructing a cascade of failures, but also to single out dynamically emerging and disappearing contours, which may include components of both the same and different networks.

Keywords: network system, emergence, House of Quality (HoQ), reliability, cascading failures, dynamic emerging and disappearing cycles

References

1. Dugin A. “Setevye vojny”. Analiticheskij doklad Aleksandra Dugina pri uchastii Valeriya Korovina i Aleksandra Bovdunova [“Network Wars”. Analytical report by Alexander Dugin with the participation of Valery Korovin and Alexander Bovdunov]. Seti, kognitivnaya nauka, upravlenie slozhnost'yu [Networks, Cognitive Science, Complexity Management], 2014, available at: <https://spkurdyumov.ru/networks/setevye-vojny/> (accessed: 08.20.2024).
2. Lee K., Lee H.-W., Modiano E. Reliability in layered networks with random link failures. Proceedings of the 29th Conference on Information Communications, ACM Transactions on Networking, 2010, vol. 19, no. 6, 10 p.
3. Surma I.V., Annenkov V.I., Karpov V.V., et al. “Setecentricheskoe upravlenie”: sovremennaya paradigma razvitiya sistem upravleniya v vooruzhennyh silah vedushchih derzhav mira [“Network-Centric Management”: modern paradigm of management systems development in the armed forces of the world's leading powers]. Nacional'naya bezopasnost' [National Security], 2014, no. 2(31), 11 p., DOI: 10.7256/2073-8560.2014.2.11393.
4. Buldyrev S.V., Parshani R., Paul G., et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. Nature, 2010, vol. 464, 4 p., DOI: 10.1038/nature08932.
5. Martin-Hernandez J., Wang H., Van Mieghem P., et al. Algebraic connectivity of interdependent networks. Physica A, 2014, vol. 404, pp. 92-105.
6. Bashan A., Berezin Y., Buldyrev S.V., et al. The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks. Nature Physics, 2013, vol. 9, pp. 667-672.
7. Li W., Bashan A., Buldyrev S.V., Stanley H.E., et al. Cascading failures in interdependent lattice networks: The critical role of the length of dependency links. Physical review letters, 2012, vol. 108, 228702, DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.228702.
8. Buldyrev S.V., Shere N.W., Cwlich G.A. Interdependent networks with identical degrees of mutually dependent nodes. Physical Review E, 2011, vol. 83, 016112, DOI: 10.1103/PhysRevE.83.016112.

9. Wang S., Hong L., Ouyang M., et al. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies. *Safety science*, 2013, no. 51, pp. 328-337.
10. Valdez L.D., Macri P.A., Stanley H.E., et al. Triple point in correlated interdependent networks. *Physical review E*, 2013, vol. 88, 050803, DOI: 10.1103/PhysRevE.88.050803.
11. Wang J., Jiang C., Qian J. Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures. *Physica A*, 2014, vol. 393, pp. 535-541.
12. Chen Z., Du W.-B., Cao X.-B., et al. Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack. *Chaos, solitons & fractals*, 2015, no. 80, pp. 7-12.
13. Tan F., Xia Y., Wei Z. Robust-yet-fragile nature of interdependent networks. *Physical review E*, 2015, vol. 91, 052809, DOI: 10.1103/PhysRevE.91.052809.
14. Jun T., Piera M.A., Ruiz S. A causal model to explore the ACAS induced collisions. *Journal of aerospace engineering*, 2014, vol. 228, no. 10, pp. 1735-1748.
15. Du R., Dong G., Tian L., et al. Targeted attack on networks coupled by connectivity and dependency links. *Physica A*, 2016, vol. 450, pp. 687-699.
16. Berezin Y., Bashan A., Danziger M.M., et al. Localized attacks on spatially embedded networks with dependencies. *Scientific reports*, 2015, vol. 5, 8934. DOI: 10.1038/srep08934.
17. Shao S., Huang X., Stanley H.E., et al. Percolation of localized attack on complex networks. *New journal of physics*, 2015, vol. 17, 023049. DOI: 10.1088/1367-2630/17/2/023049.
18. Wu B., Tang A., Wu J. Modeling cascading failures in interdependent infrastructures under terrorist attacks. *Reliability engineering & system safety*, 2016, no. 147, pp. 1-8.
19. Dong G., Hao H., Du R., et al. attack on clustering networks. *New Journal of Physics*, 2019, vol. 21, no. 1. DOI: 10.1088/1367-2630/aaf773.
20. Yuan X., Dai Y., Stanley H.E., Havlin S. K-core percolation on complex networks: Comparing random, localized, and targeted attacks. *Physical Review E*, 2016, vol. 93, 062302. DOI: 10.1103/PhysRevE.93.062302.
21. Qiu Y. Optimal weighting scheme and the role of coupling strength against load failures in degree-based weighted interdependent networks. *Physica A*, 2013, vol. 392, pp. 1920-1924.
22. Stippinger M., Kertesz J. Enhancing resilience of interdependent networks by healing. *Physica A*, 2014, vol. 416, pp. 481-487.
23. Hong S., Lv C., Zhao T., et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network. *Physica A*, 2016, vol. 49, pp. 1-11.
24. Dong G., Hao H., Du R., et al. Localized attack on clustering networks. *arXiv*, 2016, DOI: 10.48550/arXiv.1610.04759.
25. Quality Function Deployment (QFD): Key Components of QFD. January 9, 2024, available at: <https://bgmcgroup.com/quality-function-deployment-qfd-key-components-of-qfd/> (accessed:01/20/2024).
26. Holland O.T. Taxonomy for the modeling and simulation of emergent behavior systems. *Proceedings of spring simulation multiconference "Society for Computer Simulation International"*, 2007, vol. 2, pp. 102-109, DOI: 10.1145/1404680.1404684.
27. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a tree-like network of interdependent networks. *arXiv*, 2011. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.066134.
28. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a network of networks. *Physical Review Letters*, 2011, vol. 107, 193903. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.195701.
29. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a network formed by n interdependent networks with a one-to-one correspondence of dependent nodes. *Physical Review E*, 2012, vol. 85, 066134. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.066134.
30. Gaogao D., Ruijin D., Lixin T., et al. Robustness of network of networks with interdependent and interconnected links. *Physica A*, 2013, vol. 424, pp. 11-18.
31. Dong G., Gao J., Du R., Tian L., et al. Robustness of network of networks under targeted attack. *Physical Review E*, 2013, vol. 87, 052804. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.052804.
32. Dong G., Tian L., Zhou D., et al. Robustness of n interdependent networks with partial support-dependence relationship. *Europhysics Letters*, 2013, vol. 102, no. 6. DOI: 10.1209/0295-5075/102/68004.
33. Kaplan S., Zlotin B., Visnepolschi S., Zusman A. New tools for failure and risk analysis: an introduction to anticipatory failure determination (AFD) and the theory of scenario structuring. *Ideation International Incorporated*, 1999, 83 p.
34. GOST R 53111–2008. Ustojchivost' funkcionirovaniya seti svyazi obshchego pol'zovaniya. Trebovaniya i metody proverki [Stability of functioning of the public communication network. Requirements and testing methods]. Moscow, Standartinform Publ., 19 p.
35. Vittih V.A. Vvedenie v teoriyu intersub"ektivnogo upravleniya [Introduction to the theory of intersubjective management]. Samara, Samarskij nauchnyj centr RAN [Samara scientific center of RAS], 2013, 64 p.
36. Brown A.W. Model driven architecture: principles and practice. *Software and Systems Modeling*, 2004, vol. 3, pp. 314–327. DOI: 10.1007/s10270-004-0061-2.
37. Braun W. The system archetypes. Copyright, 2002, 26 p.

38. Gvozdev V.E., Guzairov M.B., Bezhaeva O.Ya. Analiz vliyaniya kachestva upravleniya projektom na sostoyanie funktsional'noy bezopasnosti apparatno-programmnykh kompleksov na osnove sistemnogo arhetipa «predel rosta» [Analysis of the influence of project management quality on the functional safety state of hardware-software complexes based on the "limits to growth" system archetype]. Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tehnologii [Modeling, Optimization and Information Technologies], 2021, vol. 9, no. 3, pp. 1-15. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.026.
39. Gvozdev V.E., Bezhaeva O.Ya., Rakitova A.S., et al. Analiz strukturnoy nadezhnosti mnogoslojnykh vzimodejstvuyushchikh setej peredachi dannykh [Analysis of structural reliability of multilayer interacting data transmission networks]. Vseros. nauchnaya konferenciya "Opyt i perspektivy sovershenstvovaniya sistem svyazi i akusticheskikh ispytaniy sovremennoy tekhniki" [All-Russian Scientific Conference "Experience and Prospects for Improving Communication Systems and Acoustic Tests of Modern Equipment"]. Saint Petersburg, 2025.
40. Dunn S., Holmes M., Wilkinson S. Modelling interdependent cascading failures in real world complex networks using a functional dependency model. Resilience and reliability of infrastructures, 2024, 6 p., available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/29416083.pdf>
41. Nikolaev V.I., Bruk V.M. Sistemotekhnika: metody i prilozheniya [System Engineering: Methods and Applications]. Leningrad, Mashinostroyeniye [Mechanical engineering] Publ., 1985, 199 p.
42. Gaskarov D.V., Golinkovich T.A., Mozgalevskiy A.V. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury [Forecasting the Technical Condition and Reliability of Electronic Equipment]. Moscow, Sovetskoye radio [Soviet radio] Publ., 1974, 224 p.

Gvozdev Vladimir Efimovich. Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Cybernetics, Ufa University of Science and Technology. AuthorID: 174520, SPIN: 7043-9040, ORCID: 0009-0004-8557-3445, Scopus AuthorID: 7101700484, wega55@mail.ru, 450008, Ufa, K. Marx St., 12.

Bezhaeva Oxana Yakovlevna. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technical Cybernetics, Ufa University of Science and Technology. AuthorID: 271220, SPIN: 9785-3875, ORCID: 0000-0002-3373-7266, Scopus AuthorID: 57216845244, bezhaeva@gmail.com, 450008, Ufa, K. Marksa St., 12.

Rakipova Aliya Salavatovna. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Cybernetics, Ufa University of Science and Technology. AuthorID: 869995, SPIN: 3553-4512, ORCID: 0000-0002-7548-2134, Scopus AuthorID: 57200183868, RakipovaAS@uust.ru, 450008, Ufa, K. Marksa str., 12.

Rakipov Radik Ralifovich. Head of the Technical Support Division, EMERCOM of Russia. AuthorID: 1288037, SPIN: 8024-1941, radikrakipovnsav@mail.ru, 121357, Moscow, Vatutina St., 1.

Prihodko Vladimir Evgenievich. Deputy Director General for Research and Development, Soliton Research Institute. AuthorID: 1311599, SPIN: 5561-6677, v.prihodko@soliton.com.ru, 450080, Ufa, S. Zlobina St., 31.

Teplyashin Pavel Nikolaevich. Head of the Computer Science and Programming Department, Soliton Research Institute. AuthorID: 1310228, SPIN: 7724-6529, tepik@soliton.com.ru, 450080, Ufa, S. Zlobina St., 31.

Статья поступила в редакцию 08.04.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 16.10.2025.

The article was submitted 04/08/2025; approved after reviewing 09/24/2025; accepted for publication 10/16/2025.