

УДК 004.72

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.024](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.024)

## Обеспечение функциональной надежности телекоммуникационных систем на основе топологического ресурса

В.Е. Гвоздев<sup>1</sup>, М.Б. Гузаиров<sup>1</sup>, А.С. Ракипова<sup>1</sup>, Р.Р. Галимов<sup>2</sup>, В.Е. Приходько<sup>3</sup>,  
П.Н. Тепляшин<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральное казенное предприятие «Авангард», Стерлитамак, Российская Федерация

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт «Солитон», Уфа, Российская Федерация

**Резюме.** Современные коммуникационно-вычислительные системы специального назначения выполняют задачи, в первую очередь, по доставке информации между распределенными в пространстве органами, задействованными в решении задач сетевых систем управления. Для современных коммуникационно-вычислительных систем характерен переход к гибриднему построению, децентрализованной сетевой архитектуре, что предопределяет формирование единого информационного пространства на основе интеграции информационных систем разной ведомственной принадлежности, и созданных на основе различных методических и технологических платформ. В работе в качестве подходов, позволяющих с единых методических позиций исследовать свойства локальных информационных систем, использованы топологический и ресурсный подходы. Концептуальной основой являлось положение о том, что перспективным подходом к маршрутизации в условиях динамического изменения состояния телекоммуникационной системы является формирование совокупности резервных путей доставки сообщений, что позволит повысить надежность и стабильность функционирования системы. Определены особенности формирования резервных путей, ограничивающие возможность механического переноса методов резервирования, разработанных для технических систем, в область ТКС. Предложена метрика, позволяющая анализировать возможные пути передачи сообщений между узлом-источником и узлом назначения по комплексу статических и динамических признаков.

**Ключевые слова:** коммуникационно-вычислительные системы, функциональная надежность, телекоммуникационные системы, топология, маршрутизация, динамическая структура.

**Для цитирования:** Гвоздев В.Е., Гузаиров М.Б., Ракипова А.С., Галимов Р.Р., Приходько В.Е., Тепляшин П.Н. Обеспечение функциональной надежности телекоммуникационных систем на основе топологического ресурса. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(3). URL: <https://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=1647> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.024

## Ensuring functional reliability of telecommunication systems based on topological resource

V.E. Gvozdev<sup>1</sup>, M.B. Guzairov<sup>1</sup>, A.S. Rakipova<sup>1</sup>, R.R. Galimov<sup>2</sup>, V.E. Prykhodko<sup>3</sup>,  
P.N. Teplyashyn<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup>Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation

<sup>2</sup>Federal State Enterprise «Avangard», Sterlitamak, the Russian Federation

<sup>3</sup>Research Institute «Soliton», Ufa, the Russian Federation

**Abstract.** Modern special-purpose communication and computing systems perform tasks, first of all, to deliver information between spatially distributed bodies involved in solving network-centric control problems. Modern communication and computing systems are characterized by a transition to a hybrid

structure, a decentralized network architecture, which predetermines the formation of a single information space based on the integration of different departmental affiliations information systems, and created on the basis of various methodological and technological platforms. In this work, topological and resource approaches are used as approaches that allow us to study the properties of local information systems from a unified methodological position. The conceptual basis was the proposition that a promising approach to routing in conditions of dynamic changes in the state of a telecommunication system is the formation of a backup message delivery paths set, which will increase the reliability and stability of the system. The features of the backup paths formation are determined, limiting the possibility of mechanical transfer of backup methods developed for technical systems to the TCS area. A metric has been proposed that allows one to analyze possible paths for transmitting messages between the source node and the destination node based on a set of static and dynamic characteristics.

**Keywords:** communication and computing systems, functional reliability, telecommunication systems, topology, routing, dynamic structure.

**For citation:** Gvozdev V.E., Guzairov M.B., Rakipova A.S., Galimov R.R., Prykhodko V.E., Teplyashyn P.N. Ensuring functional reliability of telecommunication systems based on topological resource. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1647> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.024 (In Russ.).

## Введение

В открытых литературных источниках отмечается, что в ближайшем десятилетии ключевая парадигма ведения вооруженного противоборства, действующая в армиях США и стран НАТО, а также внедряемая в Вооруженных Силах Российской Федерации, будет базироваться на концепции управления боевыми действиями по сетевидческому (сетевому) принципу [1–3]. Центральной компонентой системой сетевидческого управления является коммуникационно-вычислительная система, формирующая единое информационное пространство (ЕИП) для всех участников управления.

Транспортная инфраструктура коммуникационно-вычислительных систем формируется на базе транспортных инфраструктур стационарных наземных, а также инфраструктур мобильных воздушных, надводных / подводных и космических сетей связи, и представляет собой совокупность связанных линиями связи (в том числе беспроводными) сетевидческих узлов. Телекоммуникационная система (ТКС) стационарной наземной компоненты ЕИП представляет собой совокупность связанных линиями связи сетевидческих узлов, которая основана на единой транспортной технологии и эксплуатируется в соответствии с едиными принципами маршрутизации, адресации и управления, при этом в ее составе имеются граничные узлы, ответственные за допуск трафика в сеть или направление его в другие смежные телекоммуникационные системы.

Предсказуемость поведения – базовое свойство, которым должна обладать каждая сложная управляемая система, к числу которых относятся ТКС. Предсказуемость поведения, определяемая структурной надежностью ТКС, предопределяет подходы к выбору методов маршрутизации сообщений.

Алгоритмы маршрутизации можно условно разделить на две большие группы: однопутевая маршрутизация и многопутевая. При однопутевой маршрутизации передача информации осуществляется по одному каналу связи, при многопутевой, как можно понять из названия, для передачи трафика одновременно используется несколько маршрутов к одному получателю. Одними из важнейших требований, предъявляемых к протоколам маршрутизации, являются надежность и отказоустойчивость [4].

Одним из направлений совершенствования маршрутизации в сетях с динамически изменяемой структурой и характеристик каналов является более полное использование имеющегося топологического ресурса сети. Одним из методов, реализуемых в рамках

использования топологического ресурса, является формирование помимо кратчайшего пути передачи сообщений от узла-источника к узлу назначения дополнительных резервных путей. Данные пути предполагается использовать, если в результате дестабилизирующих воздействий (преднамеренных либо непреднамеренных) топология сети изменилась и требуется произвести передачу сообщения без прерывания процессов передачи трафика.

В [5] обосновывается важность проактивного резервирования как способа восстановления трафика в случае отказов в сети. Отмечается, что защита сетей предполагает не только выделение резервной совокупности узлов и каналов, соединяющих узел-источник и узел назначения, но также резервирование сетевых ресурсов от узла-источника к узлу назначения для восстановления трафика в случае отказа по основному пути. Обсуждается приоритетная значимость разработки схем выделения резервных путей с учетом наличия ограничений на объемы ресурсов, которые могут быть выделены компонентами резервных путей без снижения качества обслуживания всех трафиков, которые проходят через них. Приводится классификация подходов к резервированию, основанная на соединении (link-based) и основанная на пути (path-based). В терминах теории надежности подход, основанный на соединении, эквивалентен нагруженному активному резервированию с замещением; подход, основанный на пути, эквивалентен общему нагруженному активному резервированию.

### **Влияние топологий на надежность и стабильность функционирования ТКС**

Инфраструктура телекоммуникационной системы представляет собою совокупность узлов, связанных каналами передачи сообщений. Важность задачи превентивной разработки мер по парированию негативных последствий изменения состояния ТКС, например, каскадных перегрузок вследствие изменения топологии сети из-за отказов каналов либо подключений новых узлов, обсуждается во многих литературных источниках, например, в [6–8].

Телекоммуникационная система является разновидностью сложных систем, что предполагает ее разноаспектное описание, в силу чего одним из базовых принципов построения соответствующих ей знаковых моделей является принцип полиморфизма.

В соответствии с этим одной и той же телекоммуникационной системе в зависимости от точки зрения на ее топологию (физическая / логическая) ставятся в соответствие различные знаковые модели, включая графические и математические.

*Физическая топология*, характеризующая физическую структуру телекоммуникационной сети, является критическим фактором, определяющим такую латентную системную характеристику ТКС, как надежность. Надежность сети определяет способностью сохранения связности графа (чему соответствует сохранение работоспособности ТКС) при удалении / отказе какого-либо узла или ребра. В рамках физической топологии ТКС рассматривают как совокупность узлов и каналов, сопоставимость свойств которых обеспечивается на основе метрических характеристик надежности [9–10].

*Логическая топология*, характеризующая возможные пути передачи сообщений, в совокупности с ограничениями на выбор путей передачи, предопределяет поведение транспортной составляющей информационной системы. Иными словами, логическая топология предопределяет потенциальность телекоммуникационной системы в рамках ограничений на свойства путей передачи сообщений. Характеристики надежности транспортной инфраструктуры (внутреннее свойство системы) ограничивают возможности управления функциональной надежностью (внешнее проявление внутренних свойств системы), например, за счет балансировки нагрузки (распределения

потока заявок по виртуальным каналам с учетом вероятности безотказной работы возможных каналов передачи сообщений, а также иных характеристик, таких как минимальная пропускная способность).

Часто инструментом, используемым для описания топологий различного содержания, является представление ее в виде связного графа  $G = G(A, R, W)$  без петель и кратных ребер. В рамках физической точки зрения узлам графа  $a \in A$  соответствуют аппаратно-программные комплексы; ребрам  $r \in R$  – каналы связи;  $w \in W$  – веса, характеризующие различные свойства каналов. В рамках логической топологии в зависимости от точки зрения на ТКС узлы могут играть разные роли (временное хранилище пакетов; маршрутизатор; сенсор, рабочая станция; переключатель, ...); а ребра иметь различную размерность (предельная пропускная способность; степень загрузки канала, интенсивность передачи, ...).

Многопотоковая ( $K$ -потоковая) маршрутизация [11–12] является одним из подходов к повышению надежности и стабильности функционирования ТКС. Выделяются следующие группы методов многопотоковой маршрутизации: резервирующие алгоритмы; избыточные алгоритмы; распределяющие алгоритмы; гибридные алгоритмы. В упомянутой работе даны краткие характеристики методов, а также приводятся в общем виде формальные постановки задач  $K$ -потоковой маршрутизации.

В рамках резервирующих алгоритмов передача сообщений осуществляется только по одному из доступных путей. При возникновении отказов в основном пути передача осуществляется по другому пути с соответствующим внесением изменений в таблицу маршрутизации. С нашей точки зрения концептуальная основа этой группы методов схожа с тем, что в теории надежности технических систем именуется общим ненагруженным резервированием.

Избыточные алгоритмы предполагают одновременную отправку сообщений по нескольким из возможных путей. Областью применимости этих методов являются ТКС, в которых главным требованием является стабильность функционирования системы в условиях отказов физических компонент сети (например, сети оборонного назначения). На наш взгляд концептуальная основа избыточных алгоритмов коррелирует с тем, что в теории надежности технических систем именуется общим нагруженным резервированием.

Распределенные алгоритмы предполагают разделение информационных потоков по заранее выбранным путям. Однако при отказе какого-либо из путей обеспечивается перераспределение потока по иным путям, что обеспечивает адаптивность ТКС с динамической структурой к изменяющимся ситуациям (т. е. реализуется одно из базовых свойств сложных систем, именуемое коэволюцией). На наш взгляд концептуальная основа этих методов коррелирует с тем, что в теории надежности технических систем именуется балансировкой нагрузки.

Основу гибридных алгоритмов составляет использование резервирования и избыточности, при этом передача сообщений осуществляется по ограниченному числу путей из  $K$  доступных (в [11] указывается  $k = 2$ ).

В целом, реализация многопотоковой маршрутизации предполагает решение следующих задач:

1. Выделение  $k$  возможных путей между парой узлов и определение среди них сильно  $n$ -связных путей [13], не имеющих общих сетевых компонентов (узлов и каналов).

2. Формирование метрик для целенаправленного отбора из выделенных сильно  $n$ -связных путей тех, по которым будет осуществляться передача сообщений; формирование метрических характеристик путей и осуществление выбора.

Более детальное рассмотрение подходов к маршрутизации на основе различных способов резервирования, включая раздельное резервирование, будет выполнено в следующем параграфе.

### Анализ надежности ТКС с позиций топологической избыточности

#### 1. Анализ надежности на основе физической топологии

Одним из подходов к обеспечению надежности ТКС является использование топологической избыточности, т. е. резервных путей доставки сообщений от узла-источника к узлу назначения [14–16]. В известной литературе фокусом исследований топологической избыточности является подход, известный в теории надежности автоматизированных систем как схемы резервирования.

#### *Избыточность физической топологии*

Рассмотрим различные способы использования топологической избыточности на конкретном примере. С точки зрения формирования на основе физической топологии резервных путей передачи сообщений от узла-источника к узлу назначения, каждому из виртуальных каналов может быть поставлена в соответствие линейная структура (путь) из чередующихся узлов и ребер. Если в состав пути входит  $N$  узлов и  $(N-1)$  ребер, и, предположив, что все ребра равно надежны и характеризуются величиной  $p_i^{(k)}$ ,  $i = \overline{1, N}$ ; а все узлы также считаются равно надежными и характеризуются величиной  $p_j^{(y)}$ ,  $j = \overline{1, N}$ , то надежность всего пути будет определяться соотношением:

$$P_{path}^{(j)} = \prod_{i=1}^{N(j)} p_i^{(y)} \cdot \prod_{m=1}^{(N(j)-1)} p_m^{(k)}. \quad (1)$$

Пример. Имеется сеть, которой ставится в соответствие физическая топология, представленная на Рисунке 1. Пунктирными линиями обозначены связи с иными, помимо рассматриваемых, узлами сети;  $E_i$  ( $i = \overline{1, 3}$ ) – стандарты цифровой передачи.

Предположим, узлом-источником является узел с номером «1»; узлом назначения – узел с номером «7».

#### *а) Общее нагруженное резервирование*

В этом случае в основе резервирования лежит выделение и одновременное использование всех возможных путей, связывающих узел-источник и узел назначения. Физически возможные пути доставки сообщения представлены в Таблице 1 (для упрощения обозначения указаны лишь узлы в составе путей).

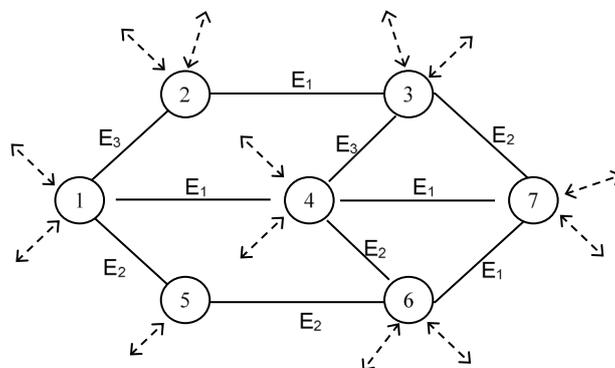


Рисунок 1 – Физическая топология сети  
 Figure 1 – Physical network topology

Таблица 1 – Пути доставки сообщения  
Table 1 – Message delivery routes

Номер пути	Узлы в составе пути
1	1-4-7
2	1-2-3-7
3	1-5-6-7
4	1-2-3-4-7
5	1-5-6-4-7
6	1-2-3-4-6-7
7	1-5-6-4-3-7

Оценка надежности путей передачи сообщений между упомянутой парой узлов на физическом уровне может выполняться посредством соотношения:

$$P_{\Sigma} = p_1^{(y)} \cdot p_7^{(y)} \cdot (1 - (1 - \prod_{j=1}^7 (1 - p_{path}^{(j)}))). \quad (2)$$

С точки зрения управления функционированием ТКС, преимуществом нагруженного резервирования является возможность балансирования нагрузки по всем каналам, связывающим узел-источник и узел назначения. Если используются все найденные пути, то, с точки зрения распределения трафика и балансировки нагрузки, выделяют равномерное распределение и взвешенное распределение трафика. При равномерной балансировке пакеты равномерно распределяются по всем найденным путям. Взвешенная балансировка нагрузки предполагает расчет на основе выбранных метрик некоторых мер, на основании которых путям присваиваются коэффициенты распределения трафика. В случае отказа одного или нескольких путей данные метрики учитываются при пересчете мер, на основе которых происходит перераспределение трафика. В литературе описаны подходы, основанные на одно- и многокритериальных метриках. При использовании мер, основанных на многокритериальных метриках, обеспечивается большая гибкость, с точки зрения удовлетворения требованиям к стабильности функционирования, но значительно возрастает сложность алгоритма и время расчета маршрута. Поэтому многокритериальная маршрутизация используется обычно в алгоритмах статической маршрутизации.

Если в рассматриваемом примере предположить, что весовые характеристики всех узлов и всех ребер одинаковые, в качестве основного следует выбрать первый путь, а пути 2–7 считать резервными. В случае общего нагруженного резервирования сети, представленной на Рисунке 1, ставится в соответствие последовательно-параллельная логическая схема, представленная на Рисунке 2. На этой схеме прямоугольниками обозначены каналы, соединяющие  $(i, j)$  узлы.

Особенностью общего постоянно нагруженного резервирования является то, что в них должны резервироваться ресурсы, равные совокупности ресурсам основного пути совокупности. Помимо этого, узел-приемник может оказаться перегруженным из-за того, что будет неоднократно получать (с задержкой по времени из-за разной длины основного и резервных путей) одни и те же пакеты. Иными словами, общее нагруженное резервирование может дать такой же эффект как flooding.

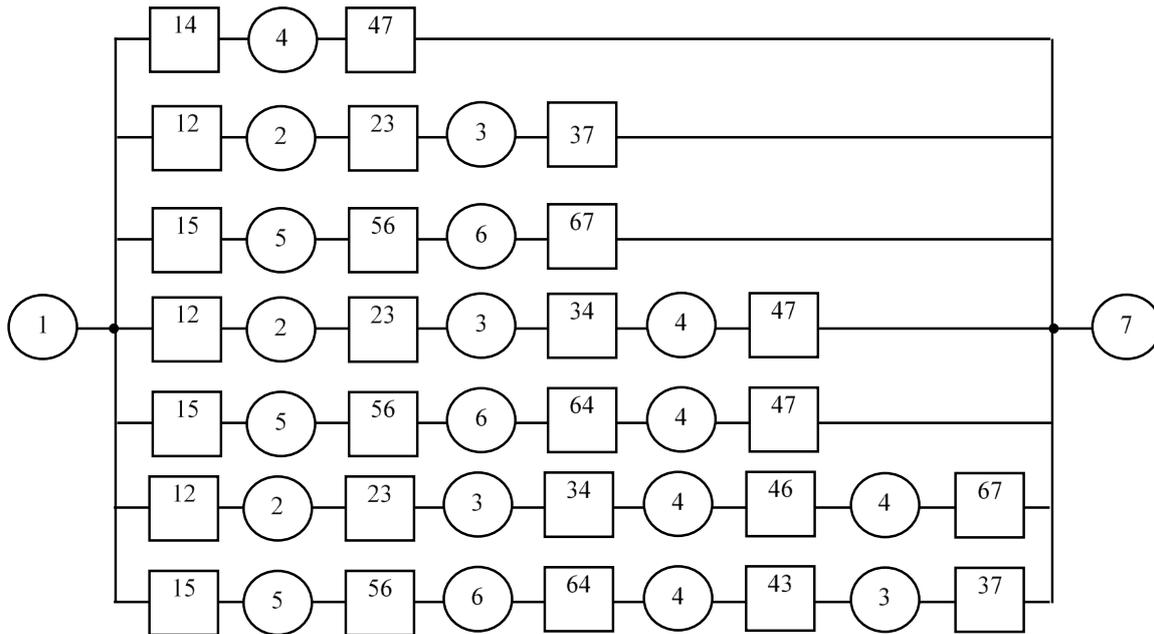


Рисунок 2 – Последовательно-параллельная схема  
Figure 2 – Series-parallel circuit

*б) Общее ненагруженное резервирование замещением*

Другим подходом к резервированию является резервирование замещением, т. е. имеет место ненагруженное резервирование, и резервный путь подключается только после отказа основного пути. Для рассматриваемого примера схема резервирования замещением приобретает вид, представленный на Рисунке 3.

При том же числе резервных каналов характеристики надежности системы с резервированием замещения выше, чем при нагруженном резервировании (в [12] приведены доказательства этого). Особенностью резервирования замещением является то, что при отказе основного пути в каждом из подключаемых путей должно иметься в наличии такое количество ресурсов, что и в замещаемом пути. Помимо этого, должно иметься устройство (Fault Manager) для подключения резервного пути. Пусть, например, в системе имеются два основных пути передачи сообщений между парами узлов  $a_1 \rightarrow a_4$  и  $a_8 \rightarrow a_9$  (Рисунок 4). Допустим, происходит разрушение пути  $a_1 \rightarrow a_4$  по причине отказа узла  $a_3$ . Информация об этом поступает в систему обработки неисправностей Fault Manager – Административное Управление Неисправностями<sup>1</sup>, представленной на рисунке прямоугольником. По команде из этой подсистемы происходит установление каналов между парами узлов  $(a_1, a_8)$  и  $(a_9, a_4)$ , а также выполняется перераспределение пропускной способности пути  $a_8 \rightarrow a_9$  так, чтобы передавались сообщения как между узлами  $a_1 \rightarrow a_4$ , так и узлами  $a_8 \rightarrow a_9$  (возможно, с меньшей скоростью). На Рисунке 4 сплошными линиями обозначены каналы, соединяющие узлы, входящие в состав путей, а также связывающие узлы пути с другими узлами системы. Штрихпунктирными линиями обозначены сообщения об отказе компоненты пути  $a_1 \rightarrow a_4$ . Двойными штрихпунктирными линиями обозначены команды Fault Manager на установление связей между узлами  $(a_1, a_8)$  и  $(a_9, a_4)$ .

*в) Раздельное нагруженное резервирование*

<sup>1</sup> Государственный стандарт РФ ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-4-99 «Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 4. Основы административного управления» (принят и введен в действие постановлением Госстандарта РФ от 25 марта 1999 г. N 92). Москва: ИПК Издательство стандартов; 1999. 11 с.

В этом случае резервируются отдельные каналы в составе путей доставки сообщения. В случае раздельного резервирования структурно-логическая схема приобретает вид (Рисунок 5).

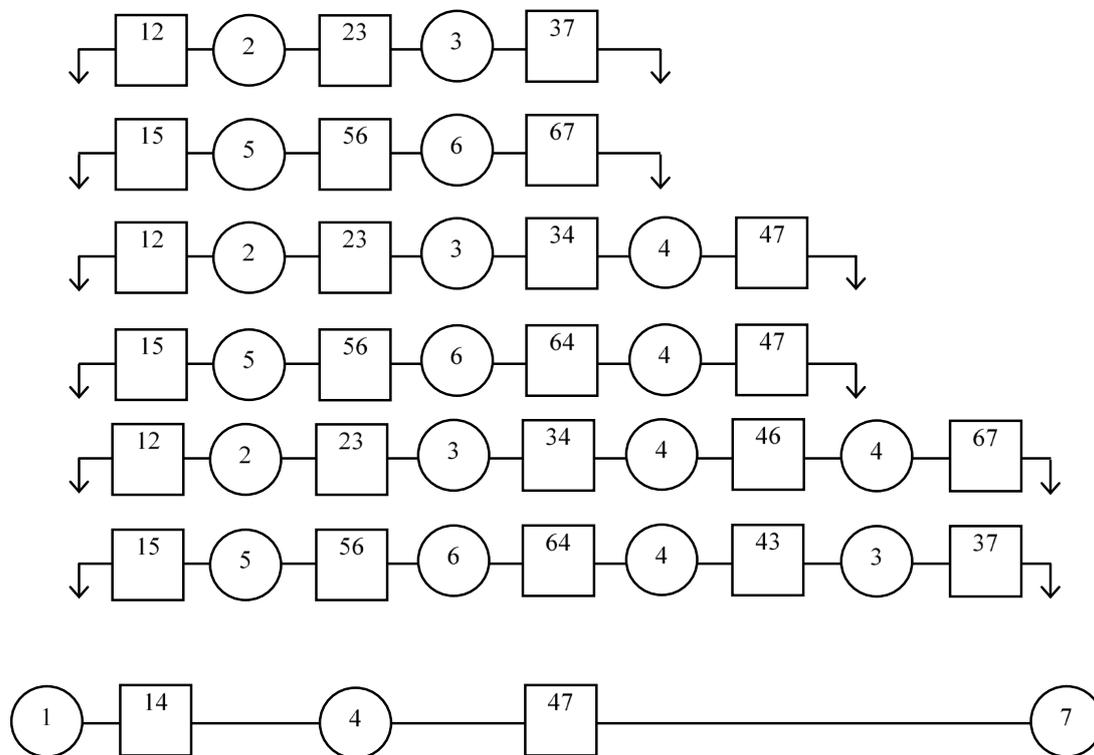


Рисунок 3 – Общее ненагруженное резервирование замещением  
Figure 3 – General unloaded replacement reservation

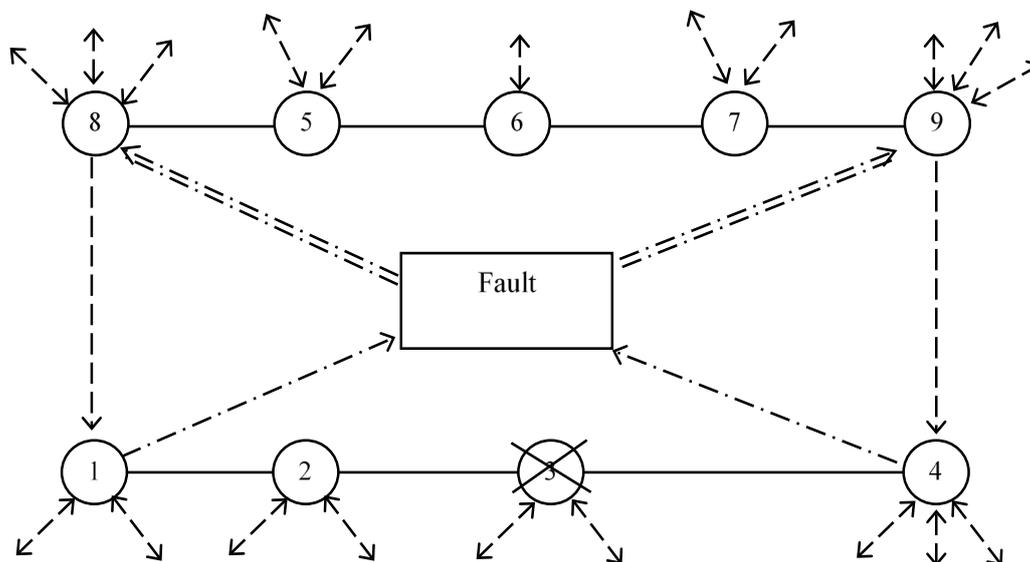


Рисунок 4 – Подключение резервного пути  
Figure 4 – Connecting a backup path

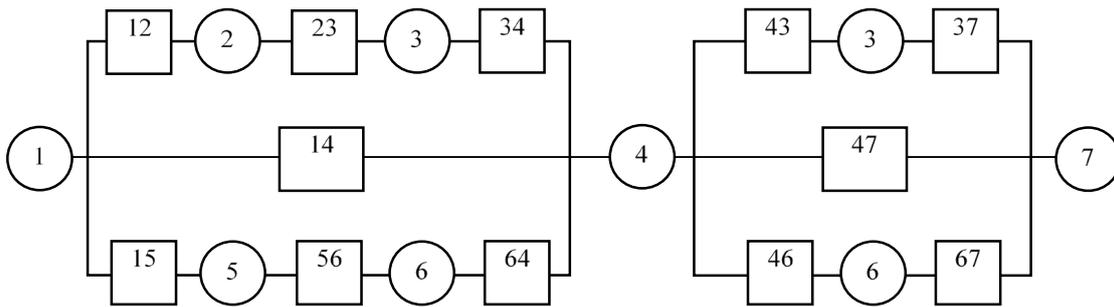


Рисунок 5 – Раздельное нагруженное резервирование  
Figure 5 – Split loaded redundancy

В [12] и других источниках показано, что при том же числе резервируемых элементов и кратности резервирования надежность схем с раздельным резервированием выше, чем в случае с общим резервированием. Подход к реализации идеи раздельного резервирования применительно к ТКС описан, например, в [17].

*2) Раздельное ненагруженное резервирование*

В работах [17, 18] описан метод обеспечения стабильности функционирования телекоммуникационной сети за счет использования топологической избыточности, фактически основанный на раздельном ненагруженном резервировании. Подчеркивается, что ограничением такого подхода являются большие затраты времени на восстановление пути передачи сообщения, нежели в случае использования раздельного либо общего резервирования.

Для рассматриваемого примера реализация этого подхода (физическое соединение) приводит к схеме, представленной на Рисунке 6.

Ограничением общего резервирования является недостаточная гибкость маршрутизации, от чего свободна схема раздельного резервирования. Пошаговая маршрутизация основана на том, что источник передает пакет на промежуточный узел, а не строит сразу весь путь до получателя. В свою очередь, промежуточный узел сам ищет наиболее подходящего соседа для передачи пакета. Такой схеме маршрутизации может быть поставлено в соответствие раздельное резервирование. Пошаговая маршрутизация обеспечивает лучшую масштабируемость при большем времени восстановления.

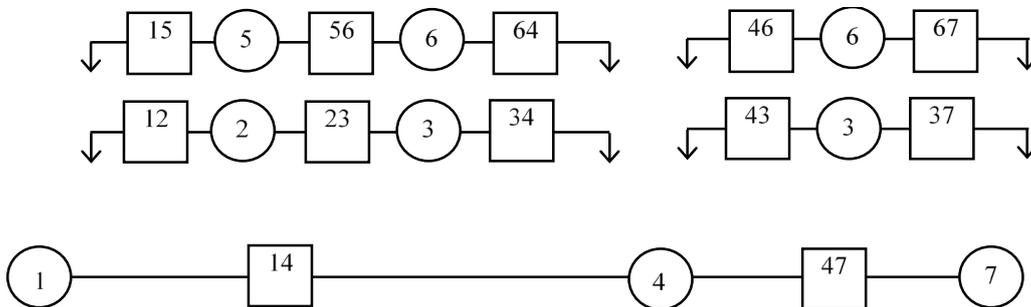


Рисунок 6 – Раздельное ненагруженное резервирование замещением  
Figure 6 – Separate unloaded redundancy by replacement

2. Анализ свойств ТКС на основе логических топологий

*а) Концептуальное отличие оценок на основе физических и логических топологий*

Резервирование в технических системах основано на физическом дублировании элементов. По этой причине возможно одновременное физическое существование всех резервных схем, выделяемых при разных подходах к резервированию. В силу этого при оценивании резервных схем в рамках физической топологии, следует ориентироваться на использование  $k$ -звенных путей [13]. Примером этому являются Рисунки 2 и 3.

Особенностью ТКС является то, что отказ какого-либо узла / канала приводит к разрушению всех путей, в которые этот компонент входит. В силу этого вместо использования  $k$ -звенных путей следует ориентироваться на выделение  $n$ -сильно связных путей [11]. Выполнение требования сильной связности обеспечивает минимальное количество теряемых путей в случае отказа отдельных аппаратно-программных компонент (узлов) либо ребер.

*б) Выделение путей передачи сообщений на основе сильно  $n$ -связных путей*

Основу выделения сильно  $n$ -связных путей составляет формирование коммуникационного матричного полинома [11]:

$$\widehat{S}^{(M)} = \widehat{C} + \sum_{m=2}^M \widehat{C}^m, \quad (3)$$

где  $\widehat{C}$  – коммуникационная матрица;  $M$  – наибольшая длина сильно связных путей;  $m$  – число звеньев в пути.

Коммуникационной матрицей называется матрица размера  $N \times N$  с двоичными компонентами, формируемыми по правилу:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если узел } i \text{ имеет связь с узлом } j \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Компоненты матрицы  $\widehat{C}^2$  вычисляются по формуле:

$$c_{ij}^{(2)} = \widehat{c}_{i1} \widehat{c}_{1j} + \widehat{c}_{i2} \widehat{c}_{2j} + \dots + \widehat{c}_{iM} \widehat{c}_{Mj}. \quad (4)$$

Для анализа звенных доминирований и путей в ТКС при  $m > 2$  вычисляются матрицы  $\widehat{C}^3, \widehat{C}^4, \dots, \widehat{C}^{(N)}$  и  $\widehat{S}^4, \dots, \widehat{S}^M$ .

Для рассматриваемого примера, предполагая равные весовые коэффициенты всех компонент путей, можно заключить, что среди выделенных путей признакам сильной  $n$ -связности удовлетворяют пути под номерами 1, 2 и 3: 1–4–7; 1–2–3–7; 1–5–6–7 (Таблица 1). Эти пути могут выступать в качестве резервных для основного (первого) пути. Эта ситуация с учетом каналов в составе путей представлена на Рисунке 7.

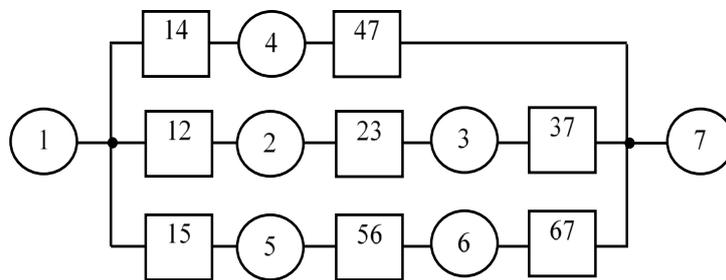


Рисунок 7 – Основной и резервный пути (схема общего резервирования)  
Figure 7 – Main and backup paths (general redundancy scheme)

В сети одновременно может осуществляться взаимодействие между совокупностью разных пар узлов, т.е. возможно, что через часть компонентов сильно  $n$ -связных путей будет также осуществлять взаимодействие и других, помимо выделенных узлов-источников и узлов-приёмников (в рассматриваемом примере – «1» и «7»), узлов

сети. При исследовании свойств резервных путей (на логическом уровне) это находит отражение в случайной полосе пропускания (bandwidth), выделенной в пути для конкретной пары узлов.

Таким образом, сопоставляя свойства логической топологии, следует отметить, что формально вид структуры совпадает с теми, которые использовались при исследовании физических топологий. Однако этим соотношениям ставятся в соответствие разные свойства сети: при проведении исследований на основе физических топологий фокусом исследований являются внутренние свойства сети; при исследованиях на основе логических топологий – внешнее поведение. Иными словами, при исследованиях на основе физических топологий фокусом исследований является изучение влияния отказов узлов и каналов на функциональную надежность; при исследованиях на основе логических топологий – на стабильность поведения сети, что и определяют ценность инфраструктуры ТКС для пользователя. Следует отметить также следующее. Для простоты рассмотрения в примере веса всех ребер графа считались одинаковыми и равными единице. На практике может сложиться ситуация, когда короткий, в смысле числа переходов, путь будет проигрывать более длинному пути по другим характеристикам (например, по пропускной способности). Известны подходы к выделению путей по признаку стоимости (например, в рамках метрики протокола OSPF). Кроме того, известны работы, связанные с формированием интегральных характеристик каналов на основе совокупности частных характеристик.

### 3. Особенности исследования свойств схем резервирования в ТКС

При использовании моделей резервирования, разработанных применительно к техническим системам, в случае ТКС следует учитывать следующие особенности.

1) В сети одновременно присутствует множество информационных потоков между разными парами узлов. Следствием этого является возможность одновременного вхождения одних и тех же компонентов сети в разные пути, как основные, так и резервные. В [18] отмечается, что автономное формирование резервных схем без учета общего, динамически изменяющегося состояния сети уменьшает практическую значимость исследований.

2) Многие решения по управлению сетью должны приниматься в режиме жесткого реального времени, поэтому необходимы эффективные онлайн-схемы. Это обстоятельство, в частности, ограничивает область применимости формальных моделей, основанных на статических последовательно-параллельных логических схемах.

3) Формирование резервных путей предполагает выделение резервным каналам и узлам ресурсов на случай отказов основных путей [18]. Это приводит к «заморозке» активов сети (например, пропускной способности каналов – bandwidth) на случай реагирования на возможные отказы компонентов сети [7]. С точки зрения экономии ресурсов сети на создание резервных путей, отдельное резервирование замещением является более предпочтительным.

4) Нагрузка компонентов ТКС является динамической, следствием чего является необходимость использования динамических весов ребер графов, соответствующих физическим и логическим топологиям. Размер сети является критическим фактором, определяющим область применимости подхода, основанного на резервировании путей передачи данных как способа повышения надежности и стабильности функционирования ТКС. Это обусловлено существенной трудоемкостью расчетов маршрутов информационных потоков по основному и резервным путям.

## Многоаспектная маршрутизация на основе характеристик топологического ресурса

В основе известных подходов к маршрутизации лежат частные критерии выбора предпочтительных путей между узлом-источником и узлом назначения из множества возможных. Каждый из этих частных критериев ориентирован на рациональное использование какого-либо ресурса сети. В литературе, связанной с телекоммуникационными системами, часто упоминаются следующие критерии: пропускная способность (bandwidth); задержка (Delay); нагрузка (Load); надежность (Reliability); количество переходов (Hops).

В [19] рассматривается подход к выбору маршрута на основе задачи нахождения двух путей с минимальной вероятностью их совместного отказа в виде нелинейной задачи целочисленного программирования и разработан алгоритм линейной аппроксимации, позволяющий получать решения, близкие к оптимальным. Однако при этом не учитывается пропускная способность каналов.

Если рассматривать задачу маршрутизации как разновидность задачи многокритериального управления в условиях динамически изменяющегося внутреннего состояния и воздействия дестабилизирующих факторов, то можно утверждать, что, с одной стороны, при выборе пути передачи сообщения следует стремиться учесть как можно больше частных критериев качества, объективно характеризующих свойства ТКС, что является реализацией известного принципа управления сложными системами – принципа комплексности. С другой стороны, следуя принципу объективности, при принятии решений следует ориентироваться лишь на те сведения, которые могут быть фактически получены в условиях динамически изменяющихся ситуаций.

Известным подходом к формированию интегральной метрической характеристики состояния системы является свертка частных критериев состояния [20]. В рамках задачи маршрутизации нами постулируются следующие положения, определяющие подход к выбору свертки:

- Взаимозаменяемость критериев, из чего следует, что проигрыш по одному критерию может компенсироваться выигрышем по-другому. Например, большая длина пути (большее число переходов) может компенсироваться большей пропускной способностью каналов в составе более длинного пути (эта идея лежит, например, в основе OSPF).

- Сопоставимость метрических характеристик критериев. Разные критерии соответствуют различным характеристикам путей, и имеют свою размерность. Сопоставимость обеспечивается посредством нормирования, причем при выборе способа нормирования исходят из того, что, во-первых, большее значение нормированного критерия соответствует предпочтительному пути. Во-вторых, нормированные значения всех критериев изменяются в одном и том же интервале, например, [0;1].

Обратимся к Рисунку 1, на котором указаны стандарты цифровой передачи для каждого из каналов. Постулируемым положением является то, что в качестве интегральной характеристики пути применимо выражение вида [20]:

$$R_{\Sigma}^{(l)} = \frac{\prod_{j=1}^m \omega_j^{(l)}}{\prod_{j=m+1}^N \omega_j^{(l)}}. \quad (5)$$

В числителе выражения представлены весовые характеристики параметров, повышающих конкурентоспособность пути; в знаменателе – весовые характеристики параметров, снижающих конкурентоспособность пути.

В приведенном соотношении обозначено:  $R_{\Sigma}^{(l)}$  – свертка критериев;  $\omega_j^{(l)}$  – весовая характеристика  $l$ -го пути по критерию  $j$ ;  $m$  – число критериев, способствующих увеличению величины свертки критериев;  $N$  – общее число учитываемых критериев.

Параметры, входящие в (5), имеют следующий смысл.

(а) *Весовой коэффициент пропускной способности*

Значение весового коэффициента определяется на основе соотношения:

$$\omega_1^{(l)} = \frac{\min\{bw_m^{(l)}\}}{\max\{\min\{\min\{bw_m^{(l)}\}\}\}}, \quad (6)$$

где  $bw_m^{(l)}$  – пропускная способность канала в составе  $l$ -го пути.

Обратимся к Рисунку 7. Ему соответствуют следующие пути между узлом-источником и узлом назначения (Рисунок 8):

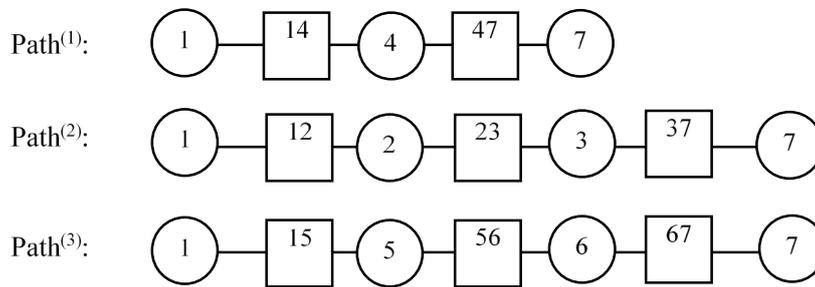


Рисунок 8 – Альтернативные пути доставки сообщения  
Figure 8 – Alternative delivery routes

Значение знаменателя (6) будет определяться выражением:

$$\max\left\{\min\left\{\min\{bw_{14}^{(1)}, bw_{47}^{(1)}\}; \min\{bw_{12}^{(2)}, bw_{23}^{(2)}, bw_{37}^{(2)}\}; \min\{bw_{15}^{(3)}, bw_{56}^{(3)}, bw_{67}^{(3)}\}\right\}\right\}, \quad (7)$$

где  $bw_m^{(l)}$  – пропускная способность канала от узла  $i$  к узлу  $j$  в составе  $l$ -го пути.

Исходя из свойств пропускной способности каналов, соответствующих стандартам  $E1, E2, E3$ , делается заключение, что знаменателю (1) следует поставить в соответствие пропускную способность, соответствующую  $E1$ . Такая же пропускная способность ставится в соответствие каждому из путей, представленных на Рисунке 8.

Таким образом, в данном примере значением  $\omega_1^{(l)}$  для всех путей будет «единица».

(б) *Весовой коэффициент, характеризующий надежность*

Основу формирования коэффициента составляет зависимость (1). Для каждого из представленных на Рисунке 8 путей посредством соотношения:

$$P_{\Sigma}^{(l)} = \prod_m P_m^{(l)} \quad (8)$$

вычисляется вероятность безотказной работы  $l$ -го пути. В (2)  $P_m^{(l)}$  – вероятность безотказной работы  $m$ -й компоненты  $l$ -го пути;  $P_{\Sigma}^{(l)}$  – вероятность безотказного функционирования всего  $l$ -го пути.

Значение весового коэффициента определяется соотношением:

$$\omega_2^{(l)} = \frac{P_{\Sigma}^{(l)}}{\max\{P_{\Sigma}^{(l)}\}}. \quad (9)$$

В рамках рассматриваемого примера надежность всех узлов принималась равной «единице». Надежность всех каналов считалась одинаковой. Однако эти допущения не

исключают возможность проведения расчетов и при других значениях показателей надежности компонентов путей.

С учетом сделанных допущений для рассматриваемого примера получаем следующие значения весового коэффициента:

$$\omega_2^{(1)} = 1; \omega_2^{(2)} = \frac{2}{3}; \omega_2^{(3)} = \frac{2}{3}.$$

*(в) Весовой коэффициент, характеризующий задержку передачи сообщений*

Задержка передачи определяется количеством промежуточных соединений и их типов; объемом буферных устройств маршрутизаторов; сходимостью сети в случае изменения физической топологии; физическими расстояниями между узлами сети; характером и уровнем дестабилизирующего воздействия.

В рассматриваемом примере исходим из того, что задержка, соответствующая определенному пути, определяется лишь количеством промежуточных узлов между узлом-источником и узлом назначения. В силу этого весовой коэффициент предлагается оценивать соотношением:

$$\omega_3^{(l)} = \frac{m_l}{\max\{m_l\}}, \quad (10)$$

где  $m_l$  – число промежуточных узлов, соответствующих  $l$ -му пути.

Для рассматриваемого примера

$$\omega_3^{(1)} = \frac{1}{2}; \omega_3^{(2)} = 1; \omega_3^{(3)} = 1.$$

*(г) Весовой коэффициент по признаку количества переходов*

Вычисление этого коэффициента предлагается определять соотношением:

$$\omega_4^{(l)} = \frac{n^{(l)}}{\max\{n^{(l)}\}}, \quad (11)$$

где  $n^{(l)}$  – количество переходов (иначе именуемых «hops»), и соответствующих числу каналов между узлом-источником и узлом назначения.

Для рассматриваемого примера коэффициент принимает значения

$$\omega_4^{(1)} = \frac{2}{3}; \omega_4^{(2)} = 1; \omega_4^{(3)} = 1.$$

Учитывая влияние (положительное/отрицательное) разных коэффициентов  $\omega_i$  на решение о выборе пути, вычислим значения обобщенного коэффициента, определяемого статическими свойствами путей:

$$K_{\Sigma}^{(l)} = \frac{\omega_1^{(l)} \cdot \omega_2^{(l)}}{\omega_3^{(l)} \cdot \omega_4^{(l)}}. \quad (12)$$

Для рассматриваемого примера значения обобщенного коэффициента, соответствующие разным путям  $l$ , представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Значения обобщенного коэффициента

Table 2 – Generalized coefficient values

$l$	$\omega_1^{(l)}$	$\omega_2^{(l)}$	$\omega_3^{(l)}$	$\omega_4^{(l)}$	$K_{\Sigma}^{(l)}$
1	1	1	1/2	2/3	3
2	1	2/3	1	1	2/3
3	1	2/3	1	1	2/3

Описанные коэффициенты характеризуют статические признаки путей. Из полученных результатов следует, что предпочтительным является первый (наиболее короткий) путь. Однако это заключение может оказаться ошибочным, так как не учитывается такая динамическая характеристика, как загрузка пути.

*(д) Весовой коэффициент по признаку загрузки пути*

Содержание этого коэффициента характеризует вероятность того, что объем случайного сообщения  $V$  не превысит доступной емкости (свободного ресурса)  $l$ -го пути  $C^{(l)}$ . В силу этого параметр загрузки  $l$ -го пути  $\omega_5^{(l)} = P\left(\frac{V}{C^{(l)}}\right)$  лежит в диапазоне  $\omega_5^{(l)} \in [0; 1]$ . В [21] рассматривается схожий по смыслу, но относимый к свойствам отдельного узла системы, параметр, именуемый «пропускная способность узла» (capacity of node).

Параметры  $V$  и  $C^{(l)}$  могут иметь смысл мгновенных значений, либо соответствовать некоторому периоду времени  $T$ :

$$V = \int_0^T v(t)dt; \quad C^{(l)} = \int_0^T c^{(l)}(t)dt, \quad (13)$$

где  $v(t)$ ,  $c^{(l)}(t)$  – функции изменения случайных параметров во времени.

Предположим, что для рассматриваемого примера  $\omega_5^{(1)} = 0,01$ ;  $\omega_5^{(2)} = 0,3$ ;  $\omega_5^{(3)} = 0,9$ . В этом случае значения  $R_\Sigma^{(l)}$  составят:  $R_\Sigma^{(1)} = 0,03$ ;  $R_\Sigma^{(2)} = 0,2$ ;  $R_\Sigma^{(3)} = 0,9$ . Очевидно, что с учетом загрузки пути наиболее предпочтительным окажется путь, хотя и содержащий больше переходов, но менее загруженный.

Предложенный подход может быть расширен на случай, когда загрузка пути задается в виде закона распределения случайной величины  $f^{(l)}(\xi^{(l)})$ , где  $\xi^{(l)} = \frac{V}{C^{(l)}}$ . Значение свертки определяется оператором  $A$  вида:

$$A: \{\{\omega\}, \{f^{(l)}(\xi^{(l)})\}\} \rightarrow R_\Sigma^{(l)}. \quad (14)$$

Предложенный подход к выбору пути основан на совокупном использовании как статических, так и динамических характеристик путей. Статические характеристики определяются физической топологией, динамические – изменением состояния каналов.

В [11] обсуждается подход, ориентированный на оптимизацию свойств не отдельного пути передачи пакетов между некоторой парой узлов ( $i, j$ ), а на оптимизацию свойств всей сети, т. е. всей совокупности взаимодействующих в настоящее время узлов ( $Q$ -routing). Необходимость совокупного изучения всех путей обусловлена тем, что возможна ситуация, когда одновременно несколько пар узлов будут стремиться использовать одну и ту же совокупность узлов (каналов) в составе своих оптимальных путей, т. е. будут конкурировать за одни и те же ресурсы (имеет место известный системный архетип «трагедия общих ресурсов – «Tragedy of the Commons» [22]). В упомянутой монографии демонстрируются преимущества ( $Q$ -routing) перед OSPF (shortest path). В предлагаемой нами метрике возможность использования одной и той же совокупности узлов / каналов в составе разных путей подчеркивается случайным характером параметра  $\omega_5^{(l)}$ .

### Заключение

В литературе, посвященной проблематике сетевых управлений, подчеркивается важность развития технологических подходов и методических основ формирования транспортной инфраструктуры единого информационного пространства на базе исторически возникших гетерогенных физических компонент, создававшихся на базе различных технологических платформ и в рамках разных методических подходов. Подчеркивается необходимость поиска путей решения проблемы интеграции

гетерогенных физических компонент, формирующих телекоммуникационные системы, обусловленная потребностью обеспечения технологической интероперабельности локальных информационных систем, формирующих сенсорную и информационные решетки в составе системы сетцентрического управления [2]. Выделяется важность «...обеспечения информационно-технологической совместимости унаследованных, принимаемых на вооружение и разрабатываемых комплексов и средств автоматизации и связи, функционирующих в составе объединенной автоматизированной цифровой системы связи ВС РФ ...».

В настоящей работе в качестве подходов, позволяющих с единых методических позиций исследовать свойства локальных информационных систем, использованы топологический и ресурсный подходы. Концептуальной основой являлось положение о том, что перспективным подходом к маршрутизации в условиях динамического изменения состояния телекоммуникационной системы является формирование совокупности резервных путей доставки сообщений, что позволит повысить надежность и стабильность функционирования системы. Определены особенности формирования резервных путей, ограничивающие возможность механического переноса методов резервирования, разработанных для технических систем, в область ТКС. Предложена метрика, позволяющая анализировать возможные пути передачи сообщений между узлом-источником и узлом назначения по комплексу статических и динамических признаков.

Перспективным направлением продолжения исследований является изучение взаимовлияния характеристик надежности и стабильности функционирования, взаимодействующих в составе единого информационного пространства решеток: сенсорной, информационной и исполнительной [2]. Известны исследования, связанные, например, с изучением взаимовлияния каскадных отказов в энергетической и транспортной распределенных системах. Однако проблема взаимовлияния и взаимодействия гетерогенных компонент ТКС, включая мобильные компоненты, на функционирование которых накладываются разные ограничения, требует дальнейшего развития теоретической базы и технологий реализации физических компонентов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Антонович П.И., Макаренко С.И., Михайлов Р.Л., Ушанев К.В. Перспективные способы деструктивного воздействия на системы военного управления в едином информационном пространстве. *Вестник академии военных наук*. 2014;(3):93–101. Antonovich P.I., Makarenko S.I., Mihaylov R.L., Ushanev K.V. New means of destructive effects on network centric military command, control and communication systems in the common information space. *Vestnik akademii voennyh nauk*. 2014;(3):93–101. (In Russ.).
2. 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. <https://doi.org/10.7256/2073-8560.2014.2.11393>  
Surma I.V., Annenkov V.I., Karpov V.V., Moiseev A.V. The "network-centric management": the modern paradigm of development of management systems in the military forces of the leading global powers. *Natsional'naya bezopasnost' / nota bene = National Security*. 2014;(2):317–327. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2073-8560.2014.2.11393>
3. Аллакин В.В. Технологии и метрики поддержания функциональной безопасности информационно-телекоммуникационной сети общего назначения. В сборнике:

- Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды VI межвузовской научно-практической конференции, 02 мая 2021 года, Санкт-Петербург, Россия.* Санкт-Петербург: Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного; 2021. С. 491–496.
- Allakin V.V. Tekhnologii i metriki podderzhaniya funktsional'noi bezopasnosti informatsionno-telekommunikatsionnoi seti obshchego naznacheniya. In: *Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voisk v sovremennykh usloviyakh: Trudy VI mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 02 May 2021, Saint Petersburg, Russia.* Saint Petersburg: S.M. Budyonny Military Academy of the Signal Corps; 2021. pp. 491–496. (In Russ.).
4. Brown J.I., Kolokolnikov T., Kooij R.E. New approximations for network reliability. *Networks*. 2024;84(1):51–63. <https://doi.org/10.1002/net.22215>
  5. Huang S., Mukherjee B. Adaptive Reliable Multi-Path Provisioning in WDM Mesh Networks. In: *2008 IEEE International Conference on Communications, 19–23 May 2008, Beijing, China.* IEEE; 2008. pp. 5300–5304. <https://doi.org/10.1109/ICC.2008.994>
  6. Crucitti P., Latora V., Marchiori M. Model for cascading failures in complex networks. *Physical Review E*. 2004;69(4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.045104>
  7. Peng R. Reliability of interdependent networks with cascading failures. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2018;20(2):273–277. <https://doi.org/10.17531/ein.2018.2.13>
  8. Valdez L.D., Shekhtman L., La Rocca C.E., Zhang X., Buldyrev S.V., Trunfio P.A., Braunstein L.A., Havlin S. Cascading failures in complex networks. *Journal of Complex Networks*. 2020;8(2). <https://doi.org/10.1093/comnet/cnaa013>
  9. Matsukawa T., Koshiji K., Tojo T. Network Reliability Design and Control Technology for Robust Networks. *NTT Technical Review*. 2023;21(12):27–32. <https://doi.org/10.53829/ntr202312fa3>
  10. Moshnikov A. Evaluation of Network Reliability and Element Importance Metrics. In: *12th Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems (MICSECS 2020): CEUR Workshop Proceedings, 10–11 December 2020, Online & Saint Petersburg, Russia.* 2020. URL: [https://ceur-ws.org/Vol-2893/paper\\_14.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-2893/paper_14.pdf)
  11. Тимофеев А.В. *Адаптивное управление и интеллектуальный анализ информационных потоков в компьютерных сетях.* Санкт-Петербург: Анатолия; 2012. 280 с.  
Timofeev A.V. *Adaptivnoe upravlenie i intellektual'nyi analiz informatsionnykh potokov v komp'yuternykh setyakh.* Saint Petersburg: Anatoliya; 2012. 280 p. (In Russ.).
  12. Богатырев В.А. *Информационные системы и технологии. Теория надежности.* Москва: Издательство Юрайт; 2024. 366 с.  
Bogatyrev V.A. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii. Teoriya nadezhnosti.* Moscow: Izdatel'stvo Yurait; 2024. 366 p. (In Russ.).
  13. Харари Ф. *Теория графов.* Москва: Мир; 1973. 300 с.  
Harary F. *Graph theory.* Moscow: Mir; 1973. 300 p. (In Russ.).
  14. Цветков К.Ю., Макаренко С.И., Михайлов Р.Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей. *Информационно-управляющие системы.* 2014;(2):71–78.  
Tsvetsov K.U., Makarenko S.I., Mikhailov R.L. Forming Reserve Paths Based on Dijkstra Algorithm in Order to Enhance Stability of Telecommunication Networks. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems.* 2014;(2):71–78. (In Russ.).

15. Макаренко С.И., Квасов М.Н. Модифицированный алгоритм Беллмана-Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем. *Инфокоммуникационные технологии*. 2016;14(3):264–274.  
Makarenko S.I., Kvasov M.N. Modified Bellman-Ford algorithm with forming the shortest and fallback paths and its application for telecommunication network stability improvement. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2016;14(3):264–274. (In Russ.).
16. Гвоздев В.Е., Гузаиров М.Б., Давлиева А.С., Галимов Р.Р. Оценка характеристик информационной безопасности радиосети MANET на основе анализа топологий связей. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2023;26(4):35–43. <http://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-4-35-43>  
Gvozdev V.E., Guzairov M.B., Davlieva A.S., Galimov R.R. Evaluation of MANET information safety characteristics based on the analysis of link topologies. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of the TUSUR University*. 2023;26(4):35–43. (In Russ.). <http://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-4-35-43>
17. Макаренко С.И. Метод обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности. *Системы управления, связи и безопасности*. 2018;(3):14–30.  
Makarenko S.I. Stability method of telecommunication network with using topological redundancy. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2018;(3):14–30. (In Russ.).
18. Das A., Martel C., Mukherjee B., Rai S. New Approach to Reliable Multipath Provisioning. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2011;3(1):95–103. <https://doi.org/10.1364/JOCN.3.000095>
19. Lee K., Lee H.-W., Modiano E. Reliability in Layered Networks With Random Link Failures. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2011;19(6):1835–1848. <https://doi.org/10.1109/TNET.2011.214342>
20. Черноруцкий И.Г. *Методы оптимизации и принятия решений*. Санкт-Петербург: Издательство «Лань»; 2001. 384 с.  
Chernorutskii I.G. *Metody optimizatsii i prinyatiya reshenii*. Saint Petersburg: Lan Publishing House; 2001. 384 p. (In Russ.).
21. Басакер Р., Саати Т. *Конечные графы и сети*. Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука»; 1973. 363 с.  
Busacker R., Saaty T. *Finite Graphs and Networks: An Introduction with Applications*. Moscow: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury izdatel'stva "Nauka"; 1973. 363 p. (In Russ.).
22. Braun W. The system archetypes. *The Systems Modeling Workbook*. 2002;1–26.

#### 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](mailto:wega55@mail.ru)  
ORCID: [0009-0004-8557-3445](https://orcid.org/0009-0004-8557-3445)

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

**Гузаиров Мурат Бакеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления информационной безопасностью Уфимского университета науки и технологий, Уфа, Российская Федерация  
*e-mail:* [guzairovmb@uust.ru](mailto:guzairovmb@uust.ru)

**Murat B. Guzairov**, Doctor of Technical 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](mailto:aliyasr21@gmail.com)  
ORCID: [0000-0002-7548-2134](https://orcid.org/0000-0002-7548-2134)

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

**Галимов Роберт Ришатович**, и. о. генерального директора Стерлитамакского федерального казенного предприятия «Авангард», Стерлитамак, Российская Федерация  
*e-mail:* [rrgalimov@gmail.com](mailto:rrgalimov@gmail.com)

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

**Приходько Владимир Евгеньевич**, заместитель генерального директора по исследованиям и разработкам, Научно-исследовательский институт «Солитон», Уфа, Российская Федерация  
*e-mail:* [v.prihodko@soliton.com.ru](mailto:v.prihodko@soliton.com.ru)

**Vladimir E. Prykhodko**, Deputy General Director for Research and Development, Research Institute «Soliton», Ufa, the Russian Federation.

**Тепляшин Павел Николаевич**, начальник отдела вычислительной техники и программирования, Научно-исследовательский институт «Солитон», Уфа, Российская Федерация  
*e-mail:* [teplik@soliton.com.ru](mailto:teplik@soliton.com.ru)

**Pavel N. Teplyashyn**, Head of the Computer Engineering and Programming Department, Soliton Research Institute «Soliton», Ufa, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 26.08.2024; одобрена после рецензирования 10.09.2024; принята к публикации 16.09.2024.*

*The article was submitted 26.08.2024; approved after reviewing 10.09.2024; accepted for publication 16.09.2024.*