

Усовершенствование функций маршрутизации и сигнализации протокола PNNI с целью повышения устойчивости сети связи

С.И. Макаренко^{1, 2, 3*}

¹Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

³ООО «Корпорация «Интел групп», Санкт-Петербург, 197372, Российская Федерация

*Адрес для переписки: mak-serg@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.04.2020

Принята к публикации 22.04.2020

Ссылка для цитирования: Макаренко С.И. Усовершенствование функций маршрутизации и сигнализации протокола PNNI с целью повышения устойчивости сети связи // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 45–59. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-45-59

Аннотация: В статье представлен вариант усовершенствования функций маршрутизации и сигнализации протокола PNNI, с целью повышения устойчивости сети связи. Повышение устойчивости сети связи на основе протокола маршрутизации PNNI достигается за счет более полного использования им имеющегося топологического ресурса сети, а также введением в данный протокол дополнительной функциональности – способности одновременно с поиском кратчайших путей формировать дополнительные резервные пути.

Ключевые слова: сеть связи, протокол маршрутизации, устойчивость сети, конвергенция сети, время сходимости, PNNI.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ основных тенденций развития телекоммуникационных сетей (ТКС) специального назначения (СН), представленный в работах [1, 2], показал, что их особенностью является функционирование в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий. Для ТКС СН такие дестабилизирующие воздействия, как правило, соответствуют воздействию средств физического поражения, средств радиоэлектронного подавления (РЭП), а также способов информационно-технического воздействия. В теоретических работах [3–5] показано, что такие воздействия существенно снижают устойчивость ТКС СН, в том числе, и за счет нарушения процессов функционирования протоколов маршрутизации. Исследование автора [6] показывает, что существующие протоколы маршрутизации слабо адаптированы для использования в сетях с динамически меняющейся топологией. Этим протоколам свойственны длительные процессы восстановления связи при изменении топологии сети, неэффективные подходы к принятию решений о перемаршрутизации

информационных потоков, недостаточно проработанные механизмы своевременного обнаружения и адекватной реакции на изменения загрузки и параметров сети. Как показано в работе [6], основным концептуальным недостатком протоколов маршрутизации является низкая эффективность их математической основы – алгоритмов поиска кратчайших путей. Подавляющая часть широко распространенных протоколов маршрутизации основана на «поглощающих» алгоритмах поиска кратчайших путей (таких, как алгоритмы Дейкстры, Беллмана – Форда, A* и др.), которые по своей сути не способны одновременно с поиском кратчайших путей в сети строить и множество дополнительных путей, которые можно было бы использовать в случае изменения топологии. Имеющиеся алгоритмы поиска нескольких путей между узлами (например, алгоритм Йена) являются итерационными и основаны на последовательном поиске все тех же кратчайших путей при удалении отдельных ребер сети. Однако в таких алгоритмах количество итераций резко возрастает при увеличении размерности сети, что препятствует приме-

нению этих алгоритмов в составе протоколов маршрутизации в сетях связи.

Указанные факторы определяют актуальное направление исследований, направленное на повышение устойчивости ТКС СН за счет совершенствования используемых в них стандартных протоколов маршрутизации, в частности, протоколов маршрутизации с установлением соединений, к которым относится и рассматриваемый в данной работе протокол PNNI (*от англ. Private Network-to-Network Interface*).

Одним из направлений устранения вышеуказанных недостатков существующих протоколов маршрутизации и, соответственно, повышения устойчивости ТКС СН, является использование имеющегося топологического ресурса в сети и формирование у существующих протоколов маршрутизации дополнительной функциональности – способности одновременно с поиском кратчайших путей формировать и дополнительные резервные пути. Эти пути предполагается использовать в случае, если в результате дестабилизирующих воздействий топология сети изменилась и требуется произвести пересчет кратчайших маршрутов, но без прерывания процессов передачи трафика.

Этот подход в теоретическом виде формализован в виде метода обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности в работе автора [7]. В другой работе автора [8] на основе данного метода предложена модификация алгоритма поиска кратчайших путей Дейкстры в направлении повышения устойчивости ТКС, за счет дополнительного формирования в сети как кратчайших, так и резервных путей. В настоящей статье предлагается рассмотреть применение вышеуказанных метода и модифицированного алгоритма Дейкстры к практике, а именно – к совершенствованию функций маршрутизации и сигнализации протокола PNNI в интересах повышения устойчивости ТКС СН с установлением соединений.

Данная работа логически продолжает цикл работ автора, посвященных совершенствованию протоколов маршрутизации, в частности протоколов OSPF [9] и EIGRP [10], в интересах повышения устойчивости ТКС СН.

1. ОСОБЕННОСТИ ПРОТОКОЛА PNNI

Протокол PNNI – стандартный протокол маршрутизации с установлением соединений, алгоритм поиска маршрута соединения в котором основан на алгоритме Дейкстры. Достаточно полное описание протокола как протокола PNNI, так и особенностей его функционирования в реальных сетях с установлением соединений, представлено в работах [11–13]. Протокол PNNI получил широкое распространение как основной протокол маршрутизации «от источника» и сигнализации в сетях ATM (*от*

англ. Asynchronous Transfer Mode), а в дальнейшем – в ТКС на основе MPLS (*от англ. Multiprotocol Label Switching*) – в сетях IP/MPLS (*от англ. Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching*), MPLS TE (*от англ. Multiprotocol Label Switching Traffic Engineering*), ASON/ASTN (*от англ. Automatic Switched Optical Network/Automatic Switched Transport Network*), OpenFlow и т. д.

Рассмотрим основные особенности реализации функций маршрутизации и сигнализации в протоколе PNNI значимые для решения задачи повышения устойчивости ТКС СН. При этом надо отметить, что эти функции в протоколе PNNI сходны с протоколом OSPF. Функции маршрутизации и сигнализации в составе PNNI выполняют соответствующие протоколы: маршрутизации и сигнализации.

1.1. Протокол маршрутизации

Протокол маршрутизации в составе PNNI отвечает за установление отношений смежности между узлами сети, а также за формирование и хранение таблиц маршрутизации (ТМ), а также их синхронизацию в узлах ТКС.

По аналогии с протоколом OSPF, в данном протоколе предусмотрены одноранговые группы PG (*от англ. Peer Group*), которые фактически являются автономными доменами маршрутизации. Эти PG имеют свои идентификаторы PGID (*от англ. Peer Group Identifier*), которые устанавливаются во время начального конфигурирования сети. Смежные узлы ТКС обмениваются пакетами Hello с идентификаторами PGID. Таким образом, обмен пакетами Hello дает возможность узлам ТКС установить отношения смежности. Поскольку сообщения Hello содержат идентификаторы PGID, то смежные узлы имеют возможность определить, к одному или к разным группам PG они относятся. Если идентификаторы PGID совпадают, то смежные узлы принадлежат одной PG, в противном случае они принадлежат к различным PG. Узлы соединяются между собой логическими каналами. Логические каналы между узлами на нижнем уровне совпадают с физическими каналами связи.

Когда узлы определили отношения связности между собой и установили логические каналы, они начинают обмен информацией по виртуальным соединениям VCC (*от англ. Virtual Channel Connection* – соединение по виртуальному каналу), которые используются в режиме RCC (*от англ. Routing Control Channel* – канал управления маршрутизацией). Узлы начинают отправлять своим соседним узлам пакеты Hello, в которых указывают свой ATM-адрес, идентификатор узла ID (*от англ. Identifier*) и ID его порта для канала. Протокол PNNI использует обмен пакетами Hello на всей длительности существования логического канала и, по причине соответствия на нижнем уровне ТКС логического канала физическому, потери пакетов Hello

служат индикатором изменения качества физического канала в то время, когда другие механизмы QoS (от англ. Quality of Service – качество обслуживания) определить сбой физического канала уже или еще не могут.

ТМ, в терминологии протокола PNNI, называется «топологическая база данных», а ее отдельные записи называются элементами состояния топологии –PTSE (PNNI Topology State Element). PTSE формируются каждым узлом сети и содержат идентификационную информацию, описание возможностей узла, а также информацию, используемую для выбора «лидера» группы PG и построения иерархии областей PNNI. Эта информация называется узловой. ТМ создается в каждой группе PG и хранится на всех узлах группы.

ТМ данных включает два типа информации:

1) состояние топологии ТКС (состояние узлов и состояние каналов);

2) информация о достижимости адресов (адреса и адресные префиксы), т.е. информация об адресах и группах адресов, с которыми могут быть установлены логические соединения.

Информацию ТМ можно разделить на атрибуты и метрики. Атрибуты используются при принятии решений об установлении/разъединении соединений или управлении сетью. Метрика – интегральный параметр, который характеризует показатель QoS отдельных каналов и узлов сети. Данные о состоянии элементов сети, например, такие как пропускная способность или задержка в логическом канале, являются динамическими параметрами. Поэтому в механизмах обработки данных о состоянии сети в PNNI предусмотрена обработка динамических метрик элементов сети.

В протоколе PNNI распространение записей PTSE между узлами ТКС происходит в два этапа:

1) начальный обмен между узлами сообщениями Hello с информацией о подключенных каналах с целью определения отношений смежности узлов в сетевой топологии и формирования ТМ;

2) последующий лавинообразный обмен сообщениями PTSE при изменении топологии сети.

Когда соседние узлы на обоих концах логического канала инициированы с помощью обмена пакетами Hello, подтвердившими принадлежность обоих узлов к одной и той же PG, узлы синхронизируют свои ТМ. Синхронизация производится с помощью обмена сообщениями PTSE. Передача PTSE производится с помощью специальных пакетов PTSP (PNNI Topology State Packet – пакет состояния топологии PNNI), в которые инкапсулируются PTSE. После принятия PTSP, содержащаяся в нем PTSE проходит верификацию, а ее достоверное принятие подтверждается пакетом-квитанцией, который передается отправителю PTSE. Если PTSE содержит более новые данные, чем уже имеющиеся в ТМ узла, производится коррекция его ТМ в соответствии

с этими новыми данными, а также передача этих новых данных другим смежным узлам.

После начального этапа инициализации сети, при последующем функционировании, рассылка сообщений PTSE происходит постоянно. Данные о достижимости узлов, содержащиеся в ТМ, подвержены старению и удаляются через определенный промежуток времени, если они не подтверждены вновь поступившими сообщениями PTSE. Узлы могут вносить изменения только в создаваемые ими PTSE. В PTSE, порожденные другими узлами, данный узел не может вносить никаких изменений. Изменения вносятся только путем замены более старого PTSE на вновь полученный. PTSE распространяются только в пределах одной группы PG.

Сообщения PTSE передаются периодически, а также в силу наступления таких событий, как изменение топологии сети или критическое изменение метрики элемента сети. После включения маршрутизатора первоначально он передает соседям свои записи PTSE. Далее, во время работы ТКС, ее состояние постоянно меняется. Могут активироваться или выходить из строя элементы сети (каналы связи и узлы), изменяться их доступность и загрузка, изменяться их параметры QoS и т. д. При выявлении таких изменений, которые превышают установленный критериальный уровень, маршрутизатор формирует новые PTSE, которые описывают эти изменения в сети и рассылает их всем своим смежным маршрутизаторам, которые рассылают их далее. Это называется лавинным обменом (flooding) PTSE. Такой лавинообразный обмен заканчивается, когда PTSE получают все узлы ТКС.

1.2. Протокол сигнализации

Протокол сигнализации в PNNI управляет установлением и завершением коммутируемых виртуальных соединений в сети. Протокол использует маршрутизацию от источника на основе поиска кратчайших путей по алгоритму Дейкстры.

При поступлении от абонента запроса на установление соединения маршрутизатор-источник (используя данные ТМ) вычисляет весь предстоящий маршрут соединения и отправляет по нему пакет-запрос на соединение. При этом в пакете содержится так называемый транзитный список DTL (от англ. Designated Transit List) – это последовательный список всех транзитных маршрутизаторов в предполагаемом соединении. Формирование списка DTL производится на основе алгоритма Дейкстры.

Маршрутизаторы внутри сети не принимают решения о маршрутизации, а просто передают запрос на установление соединения в соответствии со списком DTL. Если в процессе прохождения пакета по маршруту, заданному списком DTL, обнаруживается, что один из узлов не может установить соединение (например, вследствие недостаточного QoS

канала связи или недостаточности ресурсов узла), этот пакет возвращается обратно к узлу-источнику DTL с указанием причины отказа в соединении. Тогда узел-источник исключает элемент сети, препятствующий установлению соединения, из рассмотрения, вычисляет новый маршрут соединения, формирует список DTL и посылает пакет-запрос снова. При успешном прохождении пакета-запроса от источника к адресату – адресатом посылается уведомление источнику об успешном установлении соединения. Далее по установленному соединению передаются пакеты данных. При завершении соединения с любой из сторон посылается специальный пакет завершения соединения. По его прохождению по маршруту, указанному в списке DTL, освобождаются ресурсы маршрутизаторов, ранее выделенные для данного соединения. Общая схема функционирования маршрутизатора с протоколом PNNI представлена на рисунке 1.

2. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ДЕЙКСТРЫ

В основе предлагаемого усовершенствования функций маршрутизации и сигнализации протокола PNNI лежит использование модифицированного алгоритма поиска кратчайших путей Дейкстры, ранее опубликованного в работе [8].

Рассмотрим кратко данный модифицированный алгоритм (рисунки 2а, 2б). При формализации алгоритма используются следующие обозначения: $D = \{d_i\}$, $i = 1, \dots, n$ – множество расстояний до помеченных вершин от начальной вершины;

d_i – расстояние от вершины U_1 до вершины U_i , полученное при использовании алгоритма поиска кратчайших путей;

$G(U, V)$ – ориентированный граф, соответствующий ТКС СН;

$I = 1, \dots, n$ – переменная, счетчик вершин;

$J = 1, \dots, n$ – переменная, счетчик вершин;

L – множество смежных помеченных вершин, содержащих множество расстояний от начальной вершины до помеченных вершин;

$L = \{l_i\}$, $i = 1, \dots, n$ – множество смежных помеченных вершин;

$l_i = U_j$ – помеченная вершина, через которую достигнута вершина U_i . По окончании работы алгоритма, переменная l_i содержит кратчайшие пути от i -ой вершине к каждой вершине графа;

n – количество вершин в графе;

P – множество помеченных вершин;

T – переменная, определяющая последнюю помеченную вершину;

U_1 – начальная вершина;

$V(U_i, U_j)$ – вес ребра, соединяющего i -ую и j -ую вершины;

$R = \{r\}$ – множество вершин потенциальных резервных путей (в это множество вносятся достигнутые вершины, смежные с рассматриваемой; в

дальнейшем элементы множества используются при нахождении резервных путей);

$C = \{c\}$ – множество весов ребер потенциальных резервных путей (в это множество вносятся веса ребер, исходящих из вершин, вносимых в множество R , и входящих в рассматриваемую вершину);

$Z = \{z\}$ – множество резервных путей в вершину (содержит резервные пути в рассматриваемую вершину, сформированные в результате проведения логических операций над входящими в него элементами и элементами множеств R и L);

$S = \{s\}$ – множество весов резервных путей к вершине (содержит веса путей из множества Z и используется для ранжировки резервных путей при выводе результатов работы алгоритма).

К новым элементам алгоритма относятся блоки 16–23, 25 (см. рисунки 2а и 2б). В блоках 16–17 реализуется формирование множества вершин R к текущей рассматриваемой вершине. В блоках 18–23, путем пересечения множеств R и L , а также Z , осуществляется формирование множества Z резервных путей. В блоке 25 – ранжировка резервных путей по сумме весов, входящих в их состав ребер.

3. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФУНКЦИЙ МАРШРУТИЗАЦИИ И СИГНАЛИЗАЦИИ ПРОТОКОЛА PNNI

В рамках совершенствования функций маршрутизации и сигнализации протокола PNNI для использования его в составе ТКС СН предлагается реализовать несколько направлений доработки данного протокола:

1) расчет «маршрутов от источника» необходимо вести по модифицированному алгоритму Дейкстры, представленному в работе [8], который одновременно с кратчайшими путями формирует и множество резервных путей;

2) в списке транзитных маршрутизаторов DTL необходимо формировать как кратчайшие, так и резервные пути, ранжированные по уровню увеличения суммарной метрики маршрута, а при отправке запроса на установление соединения запрос отправляется как по кратчайшему пути, так и по резервным путям;

3) при получении ответа от адресата и инициализации процесса установления соединения по кратчайшему пути в списке DSL, дополнительно устанавливаются логические резервные соединения, резервное соединение с минимальной метрикой – в режиме «горячего резерва», остальные резервные соединения – в режиме «холодного резерва»;

4) при поступлении от другого маршрутизатора сообщения PTSE об изменении топологии ТКС СН или метрики элемента сети, а также в случае самостоятельного выявления подобных фактов, маршрутизатор вместо инициализации долговременной процедуры установления нового соединения инициализирует переход передачи трафика на резервное соединение.

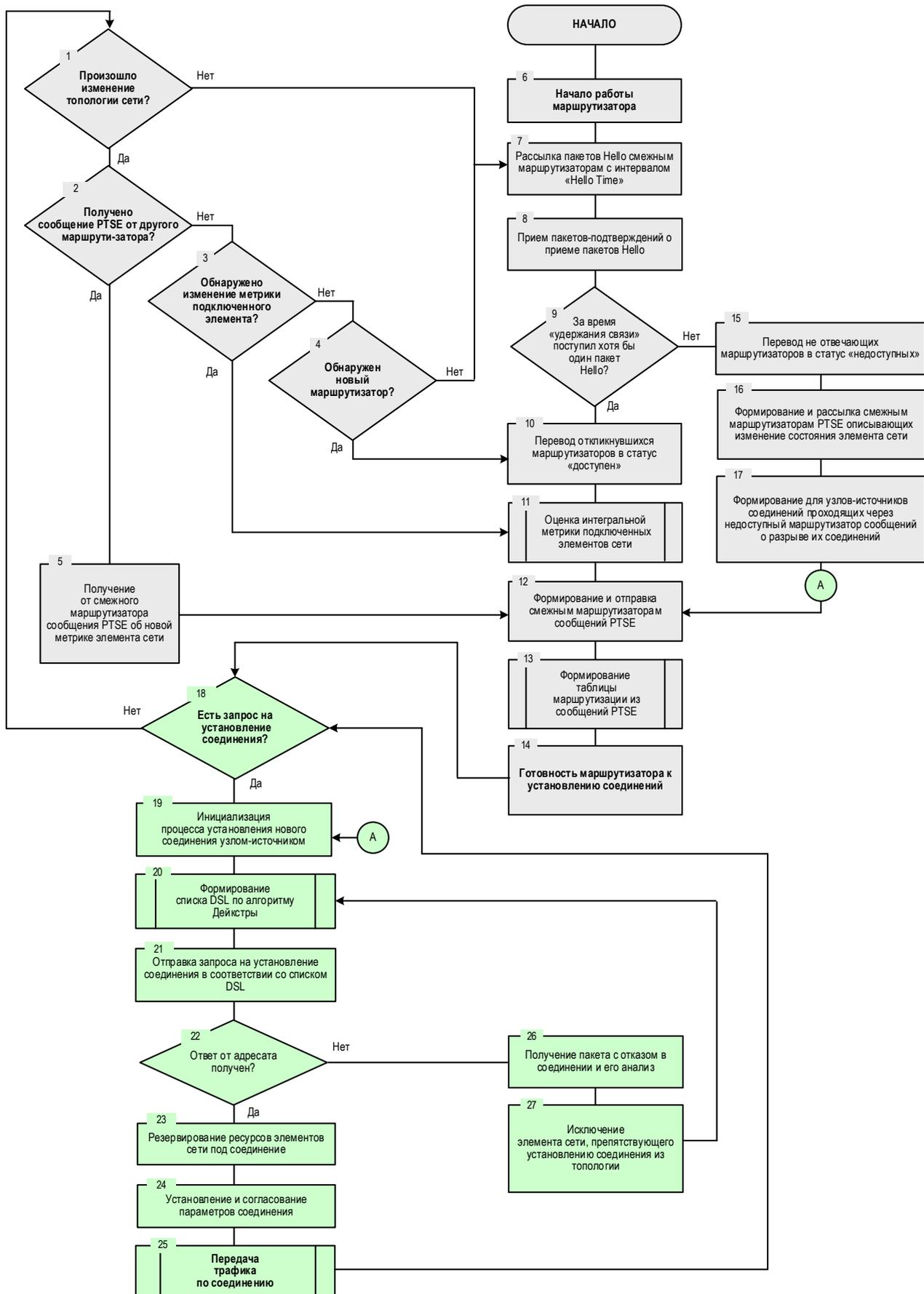


Рис. 1. Схема функционирования маршрутизатора на основе протокола PNNI [11–13]

Fig. 1. Functioning Scheme of a Router with PNNI Protocol [11–13]

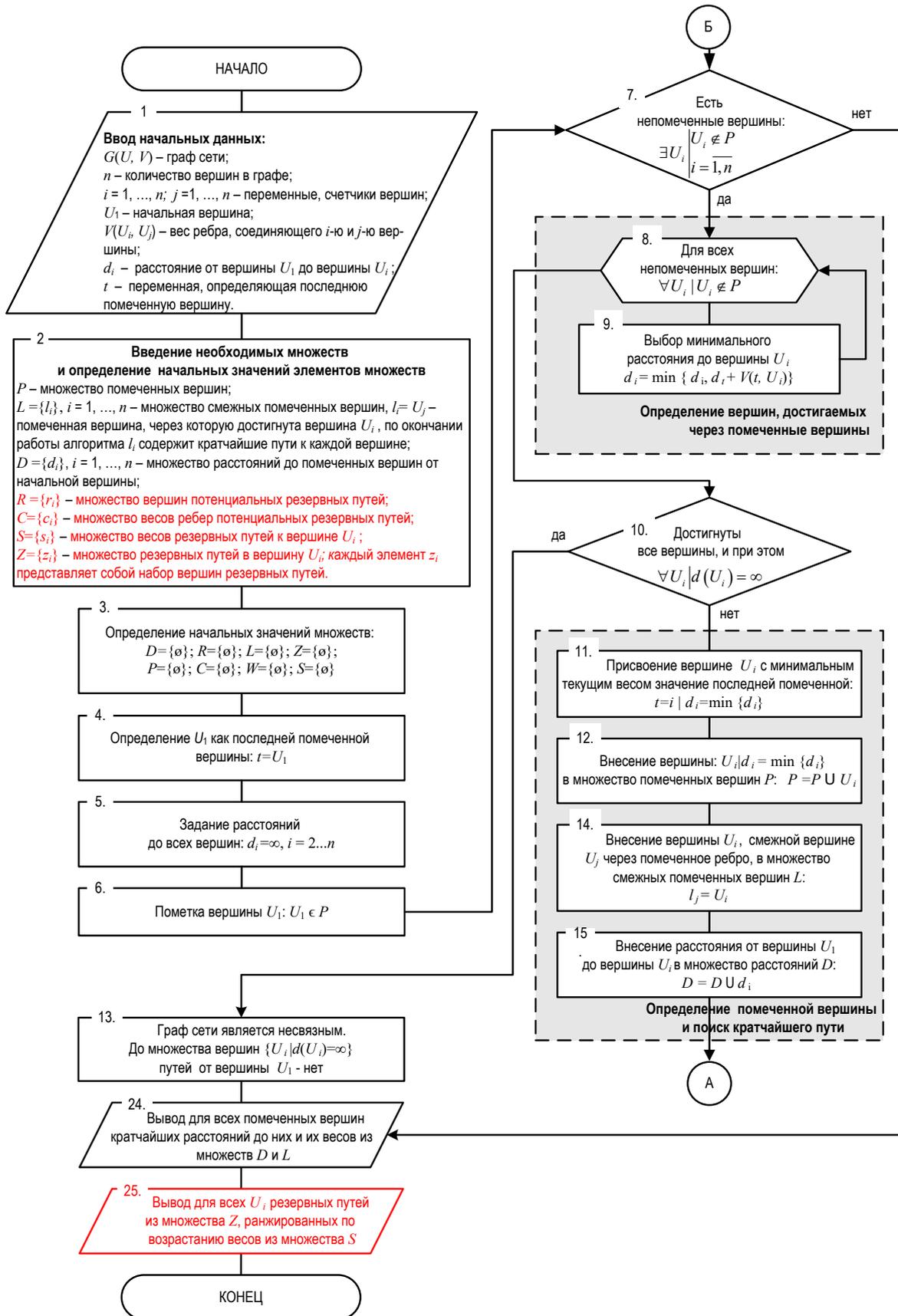


Рис. 2а. Модифицированный алгоритм поиска кратчайших путей Дейкстры [8]

Fig. 2a. Modified Dijkstra Algorithm for the Shortest Path Search [8]

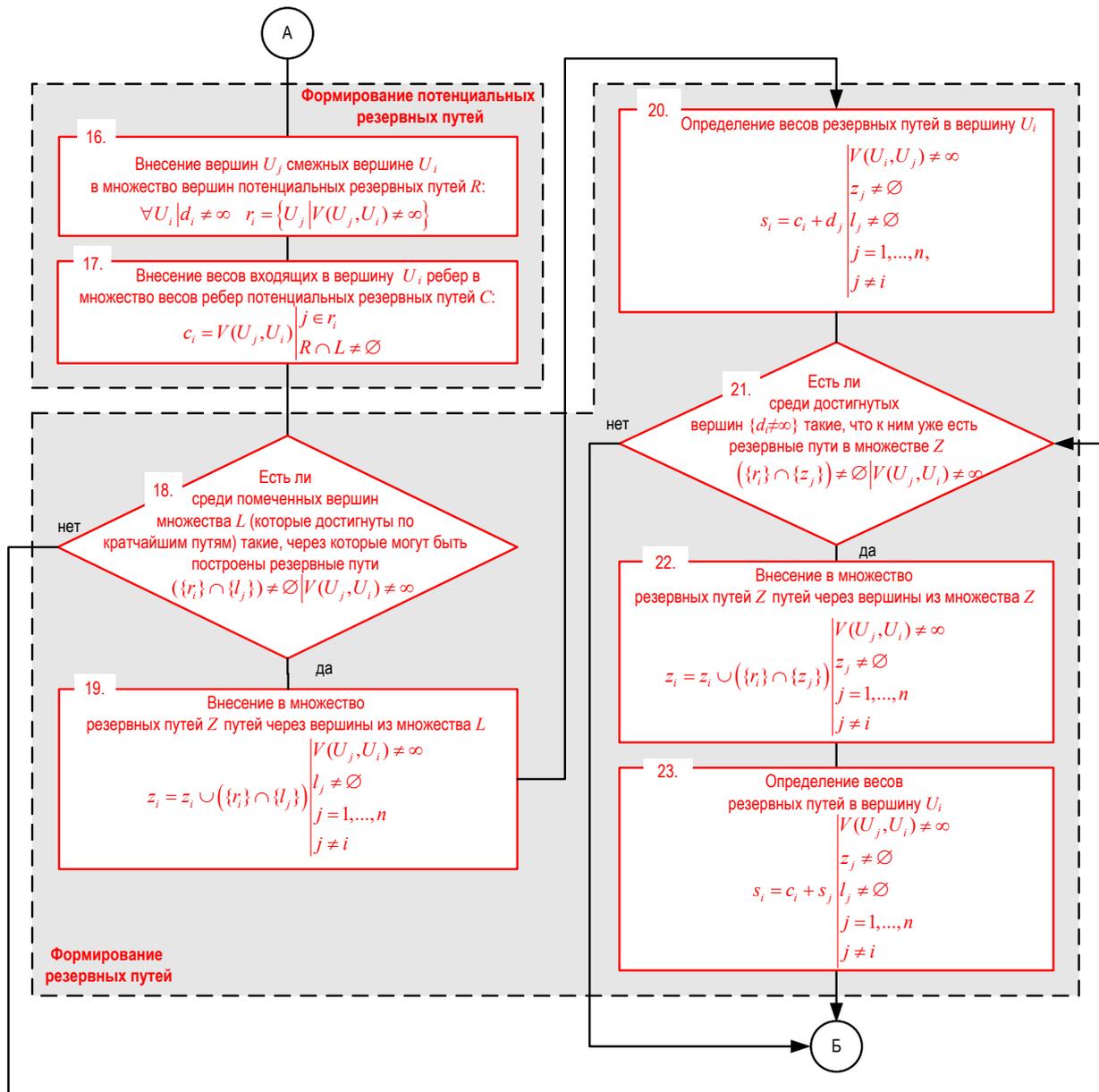


Рис. 2б. Модифицированный алгоритм поиска кратчайших путей Дейкстры [8] (продолжение)

Fig. 2b. Modified Dijkstra Algorithm for the Shortest Path Search [8] (continued)

Схема функционирования усовершенствованных функций маршрутизации и сигнализации протокола PNNI представлена на рисунке 3. К измененным функциям протокола PNNI относятся блоки 17, 20–21, 23–26, 28–29, 30–34.

Блок 17 содержит изменения, связанные с усовершенствованием реакции протокола PNNI в части реакции на сообщения PTSE об изменении топологии ТКС СН. Данный блок при выявлении критических изменений топологии (которое выявляется за счет прерывания поступления сообщений Hello) рассылает узлам-источникам сообщения о необходимости перехода их соединений на резервные пути. В результате каждый из узлов-источников реализует инициализацию процессов перехода соединений, затронутых изменениями в сети, на резервные пути (переход «А» на рисунке 2). Ранее

аналогичный блок в стандартном протоколе PNNI рассылал сообщения о прерывании соединений и тем самым инициировал их разрыв и процесс их повторной установки.

Блоки 20–21 отличаются тем, что при расчете «маршрутов от источника» используют модифицированный алгоритм поиска кратчайших путей Дейкстры, впервые разработанный в данном исследовании, который одновременно с кратчайшими путями формирует и множество резервных путей.

Далее при формировании списка транзитных маршрутизаторов DTL указываются как кратчайшие, так и резервные пути, ранжированные по уровню увеличения суммарной метрики маршрута, а при отправке запроса на установление соединения, запрос отправляется как по кратчайшему пути, так и по резервным путям.

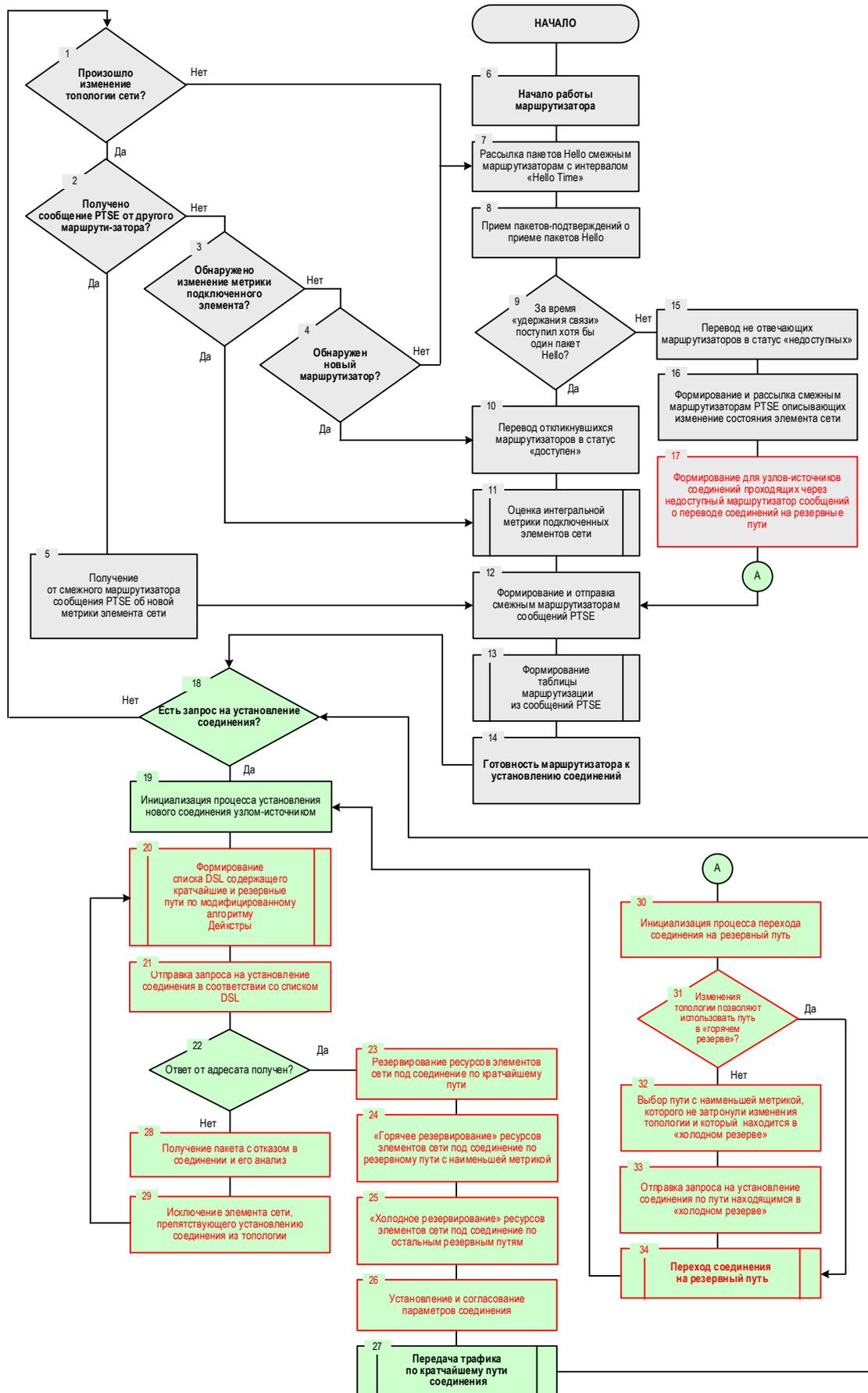


Рис. 3. Схема функционирования маршрутизатора с усовершенствованным протоколом PNNI
 Fig. 3. Functioning Scheme of a Router with Improved PNNI Protocol

Блоки 23–26 отличаются тем, что при установлении соединения, основное соединение устанавливается по кратчайшему пути в списке DSL, при этом дополнительно устанавливаются и резервные логические соединения. Резервное соединение с минимальной метрикой – в режиме «горячего резерва» (маршрутизаторы формируют ID логических каналов и путей, резервируют под данное соединение часть своих ресурсов и пропускную способность каналов связи), остальные резервные соединения – в режиме «холодного резерва» (маршрутизаторы формируют ID логических каналов и путей, и готовы переключиться на данные резервные соединения, «по требованию» от узла-источника). Соединение устанавливается после согласования параметров, как основного пути, так и резервных путей, и по нему начинается передача трафика.

Блоки 28–29 отличаются тем, что при обработке отказов в установлении соединений из-за недостаточности ресурсов узлов и каналов сети, учитываются ресурсы, необходимые не только основному пути, но и необходимые для формирования логических резервных путей, находящихся в «горячем» и «холодном» резерве.

Блоки 30–34 введены для реализации новой функции перехода соединения на резервный путь в случае, если выявлен отказ в сети, или получено сообщение PTSE об изменении топологии ТКС СН, которое затрагивает текущие соединения. Переход осуществляется следующим образом. При инициализации процесса перехода на резервный путь анализируются изменения в сети. Если данные изменения не соответствуют элементам резервного пути, находящегося в «горячем резерве», то соединение переключается на него. Если изменения в сети соответствуют элементам, которые находятся в составе, как основного пути, так и резервного пути в «горячем резерве», то выбирается путь с минимальной метрикой, который в своем составе не содержит этих измененных элементов. Так как этот путь находится в режиме «холодного резерва», то по данному логическому пути от узла-источника отправляется запрос, в соответствии с которым маршрутизаторы выделяют необходимые для соединения ресурсы, и после этого по резервному пути начинается передача трафика. Необходимо отметить, что процедура перехода соединения на резервный путь позволяет продолжить передачу трафика без инициализации долговременной и многоитерационной процедуры установления нового соединения. При этом, для соединения, переведенного на резервный путь, процедура установления нового соединения проводится в блоках 19–25, но без прерывания процесса передачи трафика по резервному пути. После того как новый кратчайший путь для соединения будет найден, соединение переводится на этот новый кратчайший путь (блок 26). Таким образом,

разрыва соединения не происходит, а передача трафика переводится на резервный путь на время поиска нового кратчайшего пути в сети при изменении ее топологии.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ ОБ ИТОГОВОМ ПОВЫШЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ СЕТИ

Для формирования оценок уровня повышения устойчивости прототипа ТКС СН при использовании предложений по реализации усовершенствованных функций протокола PNNI рассмотрим сценарий воздействия средств РЭП на прототип сети связи. В качестве такой сети рассмотрим некоторую гипотетическую систему спутниковой связи (ССС) в составе двух наземных шлюзовых станций (ШС) и четырех космических аппаратов (КА) связи, линии связи которой являются уязвимыми для средств и способов РЭП. Выбор ССС для рассмотрения в качестве прототипа ТКС СН обусловлен тем, что в них до сих пор широко используется протокол PNNI. При этом на ССС рассматривается два способа дестабилизирующих воздействий:

- 1) воздействие средствами РЭП «вверх» на приемные тракты восходящих линий КА связи;
- 2) воздействие средствами РЭП «вниз» на приемные тракты нисходящих линий ШС, а также на приемные тракты восходящих линий КА связи и на межспутниковые линии связи (МЛС) между ними.

С учетом вышесказанного топологическая схема прототипа ТКС СН будет выглядеть следующим образом (рисунком 4).

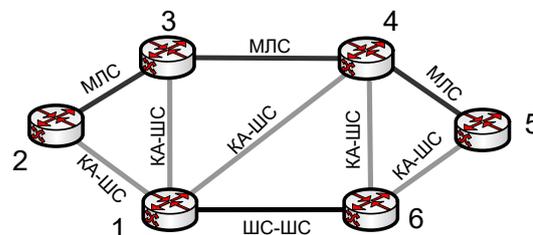


Рис. 4. Топологическая схема прототипа ТКС СН

Fig. 4. Topological Scheme of a Network Prototype

Введем следующие обозначения:

$P_{\text{Пор МЛС}}$ – вероятность поражения МЛС способами РЭП;

$P_{\text{Пор КА-ШС}}$ – вероятность поражения способами РЭП ИТВ линий связи между КА и ШС;

$P_{\text{Пор наз}}$ – вероятность поражения способами РЭП наземных линий связи;

$P_{\text{пор } v}$ – вероятность поражения v -ой линии связи способами РЭП;

$P_{\text{св}}$ – вероятность связности информационного направления связи (ИНС) в прототипе ТКС СН;

$P_{\text{У ср}}$ – вероятность среднесетевой устойчивости ИНС в прототипе ТКС СН;

$P_{\text{У 1}}$ – вероятность устойчивости ИНС, в составе которого имеется единственный кратчайший путь;

$P_{y_{k+1}}$ – вероятность устойчивости ИНС, в составе которого имеется единственный кратчайший путь и k -резервных путей;

T_0 – наработка на отказ ИНС в условиях РЭП;

$T_{\text{диагн}}$ – время диагностики отказа линии связи в ИНС;

$T_{\text{ож}}$ – время ожидания восстановления связи (удержания конфигурации ТКС СН);

$T_{\text{увед}}$ – время уведомления узла, ответственного за изменение конфигурации ТКС СН;

$T_{\text{рек}}$ – длительность реконфигурации ТКС СН, резервирования путей информационных потоков и сигнализации;

$T_{\text{перекл}}$ – время переключения потоков трафика с активного на резервные пути;

E – показатель прироста устойчивости в прототипе ТКС СН при внедрении технических предложений, разработанных в данном исследовании.

Расчет показателя устойчивости $P_{y_{\text{ср}}}$ прототипа ТКС СН до и после внедрения разработанных технических предложений по совершенствованию протокола PNNI ведется в соответствии с выражениями (1) и (2) обоснованными в работе [14].

Вероятность устойчивости ИНС в ТКС СН, при использовании алгоритма, формирующего единственный кратчайший путь из $n_{\text{осн}}$ каналов, определим по формуле [14]:

$$P_{y_1} = \frac{T_0}{T_0 + (T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} + T_{\text{увед}} + T_{\text{рек}} + T_{\text{перекл}})} \times \left(1 - \left(1 - \prod_{v=1}^{n_{\text{осн}}} (1 - P_{\text{пор } v}) \right) \right), \quad (1)$$

Устойчивость ИНС из одного основного и k резервных маршрутов (состоящих, соответственно, из $n_{\text{осн}}$, n_1 , n_2 , ..., n_k каналов), будет определяться выражением [14]:

$$P_{y_{1+k}} = \frac{T_0}{T_0 + T_{\text{диагн}} + T_{\text{перекл}}} \times \left(1 - \left(1 - \prod_{v=1}^{n_{\text{осн}}} (1 - P_{\text{пор } v}) \right) \right) \times \prod_{j=1}^k \left[1 - \prod_{i=1}^{n_j} (1 - P_{\text{пор } i,j}) \right]. \quad (2)$$

Показатель E прироста устойчивости в прототипе ТКС СН определяется согласно выражению [14]:

$$E = \left(1 - \frac{P_{y_{1+k}}}{P_{y_1}} \right) \cdot 100\%. \quad (3)$$

Расчет выигрыша E в показателе устойчивости от реализации усовершенствованного протокола PNNI проведем на примере сети, представленной на рисунке 4, но без учета временных параметров. При этом полученная оценка E является пессимистической, т. к. с учетом сокращения длительности

переходных процессов, оценка прироста устойчивости будет еще выше.

Прежде чем переходить к оценке повышения устойчивости ТКС СН в целом, для примера рассмотрим процессы установления соединений в отдельно взятом маршрутизаторе прототипа ТКС СН, обозначенном на рисунке 4 под № 1. ТМ для данного маршрутизатора, в случае использования стандартного протокола PNNI будет иметь вид, представленный в таблице 1. В случае использования в прототипе ТКС СН усовершенствованного протокола PNNI, основанного на модифицированном алгоритме Дейкстры, ТМ будет иметь вид, представленный в таблице 2.

ТАБЛИЦА 1. ТМ для маршрутизатора №1 в прототипе ТКС СН в случае использования стандартного протокола PNNI

TABLE 1. Routers Table for 1th Router of the Network Prototype When Using the Standard PNNI Protocol

ИНС	Маршрут
1-2	1-2
1-3	1-3
1-4	1-4
1-5	1-6-5
1-6	1-6

ТАБЛИЦА 2. ТМ для маршрутизатора №1 в прототипе ТКС СН в случае использования усовершенствованного протокола PNNI

TABLE 2. Routers Table for 1th Router of the Network Prototype When Using the Improved PNNI Protocol

ИНС	Основной маршрут (по кратчайшему пути)	Резервные маршруты (по k резервным путям)
1-2	1-2	1-3-2 1-4-3-2 1-6-4-3-2 1-6-5-4-3-2
1-3	1-3	1-2-3 1-4-3 1-6-4-3 1-6-5-4-3
1-4	1-4	1-3-4 1-6-4 1-2-3-4 1-6-5-4
1-5	1-6-5	1-4-5 1-3-4-5 1-4-6-5 1-2-3-4-5
1-6	1-6	1-4-6 1-3-4-6 1-4-5-6 1-3-4-5-6 1-2-3-4-6 1-2-3-4-5-6

Произведем оценку уровня повышения устойчивости ИНС в прототипе ТКС СН, исходящих из маршрутизатора №1, с учетом следующих ограничений на исходные данные о вероятностях воздействия РЭП на линии связи: вероятность пора-

жения РЭП межспутниковых линий связи $P_{\text{Пор МЛС}} = 0,05; 0,1; 0,2$; вероятность поражения РЭП линий связи КА-ШС и ШС-КА $P_{\text{Пор КА-ШС}} = 0,1; 0,2; 0,3$; наземные линии способами РЭП не поражаются, т. е. $P_{\text{Пор наз}} = 0$.

Оценка уровня устойчивости ИНС проводилась в соответствии с выражениями (1, 2), а расчет показателя прироста устойчивости E в прототипе ТКС СН производился согласно выражению (3). Результаты расчетов приведены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Результаты повышения устойчивости исходящих ИНС для маршрутизатора №1 в прототипе ТКС СН до и после внедрения усовершенствованного протокола PNNI

TABLE 3. Results of Increasing the Stability of Information Connections for 1th Router in the Network Prototype Before and after Using of the Improved PNNI Protocol

Исходные данные: $P_{\text{Пор МЛС}} = 0,05; P_{\text{Пор КА-ШС}} = 0,1; P_{\text{Пор наз}} = 0$			
ИНС	P_{y1}	$P_{y_{k+1}}$	E
1-2	0,9	0,9999	11 %
1-3	0,9	0,9999	11 %
1-4	0,9	0,9999	11 %
1-5	0,9	0,9998	11 %
1-6	1	1	0 %
$P_{y_{\text{ср}}}$	0,92	0,9999	-
Среднее значение E на ИНС			8,8 %

Продолжение таблицы 3

Table 3 Continued

Исходные данные: $P_{\text{Пор МЛС}} = 0,1; P_{\text{Пор КА-ШС}} = 0,2; P_{\text{Пор наз}} = 0$			
ИНС	P_{y1}	$P_{y_{k+1}}$	E
1-2	0,8	0,9971	24,6 %
1-3	0,8	0,9984	24,8 %
1-4	0,8	0,9983	24,8 %
1-5	0,8	0,9996	25 %
1-6	1	1	0 %
$P_{y_{\text{ср}}}$	0,84	0,9987	-
Среднее значение E на ИНС			19,8 %

Продолжение таблицы 3

Table 3 Continued

Исходные данные: $P_{\text{Пор МЛС}} = 0,2; P_{\text{Пор КА-ШС}} = 0,3; P_{\text{Пор наз}} = 0$			
ИНС	P_{y1}	$P_{y_{k+1}}$	E
1-2	0,7	0,9741	39,2 %
1-3	0,7	0,9858	40,8 %
1-4	0,7	0,9867	41,8 %
1-5	0,7	0,9916	41,7 %
1-6	1	1	0 %
$P_{y_{\text{ср}}}$	0,76	0,9876	-
Среднее значение E на ИНС			32,5 %

Анализ результатов, представленных в таблице 3 показывает, что внедрение усовершенство-

ванного протокола PNNI позволяет повысить уровень устойчивости исходящих ИНС маршрутизатора №1. Проведя аналогичные вычисления для исходящих ИНС всех маршрутизаторов прототипа ТКС СН с учетом различных вероятностей поражения способами РЭП межспутниковых линий связи и линий связи КА-ШС (ШС-КА), получим итоговые значения уровня повышения устойчивости прототипа ТКС СН, представленные в таблице 4. Отметим, что такое повышение устойчивости достигнуто на ТКС СН с относительно простой топологией. С увеличением топологической сложности сети достигаемый выигрыш будет возрастать.

ТАБЛИЦА 4. Результаты повышения устойчивости прототипа ТКС СН после внедрения усовершенствованного протокола PNNI

TABLE 3. Results of Increasing the Stability of Information Connections for Whole Network Prototype after Using of the Improved PNNI Protocol

Исходные данные: $P_{\text{Пор МЛС}} = 0...0,4; P_{\text{Пор КА-ШС}} = 0...0,4; P_{\text{Пор наз}} = 0$						
	$P_{\text{Пор КА-ШС}}$	$P_{\text{Пор МЛС}}$				
		0	0,1	0,2	0,3	0,4
	0	0 %	10 %	24 %	45 %	78 %
	0,1	7 %	17 %	31 %	52 %	85 %
	0,2	16 %	26 %	40 %	60 %	92 %
	0,3	27 %	37 %	50 %	69 %	97 %
	0,4	41 %	50 %	61 %	77 %	99 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача повышения устойчивости ТКС с установлением соединений, в том числе и сетей на основе протокола PNNI, за счет использования многопутевой маршрутизации, не нова. По постановке задачи предлагаемое решение схоже с известными методами и математическими алгоритмами поиска k кратчайших путей в сети, представленных в работах [15–22], а также с известными теоретическими подходами, ориентированными на повышение структурной устойчивости ТКС, представленных в работах [23–43]. Новизной же представленного в данной работе решения, которое отличается от вышеуказанных известных работ, является следующее:

1) повышение устойчивости ТКС СН на основе протокола PNNI реализуется по двум направлениям – за счет повышения структурной связности сети и за счет снижения длительности переходных режимов;

2) для усовершенствования функций маршрутизации и сигнализации в протоколе PNNI предложено использовать модифицированный алгоритм Дейкстры [8], который одновременно с кратчайшими путями позволяет формировать и множество резервных путей;

3) в протоколы маршрутизации и сигнализации в составе PNNI введены дополнительные операции, выполняющие «горячее» и «холодное» резер-

вирование соединений на этапе их установки, а также переход этих соединений на резервные пути при изменении топологии ТКС СН, что позволяет избежать разрыва текущих соединений и снизить время восстановления связи при динамическом изменении как метрики отдельных элементов сети, так и ее топологии в целом.

Практическая значимость предложений по совершенствованию протокола PNNI заключается в том, что они применимы к широкому спектру сетей связи. К таким сетям можно отнести как ТКС СН, использующие для маршрутизации трафика протокол PNNI (например, для ССС [27, 33,

34]), так и ТКС общего пользования (например, для наземных сетей [23–26, 35, 38, 42, 43]), использующих протокол PNNI и различные варианты его реализации в составе современных технологий связи IP/MPLS, MPLS TE, ASON/ASTN, Open-Flow и т.д. Результаты моделирования показывают, что использование усовершенствованного протокола PNNI позволяет повысить устойчивость на величину до 90 % для сетей с относительно простой топологией. При этом с увеличением топологической сложности сети уровень повышения устойчивости в ней будет возрастать.

Список используемых источников

1. Макаренко С.И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18–68. DOI:10.24411/2410-9916-2017-10202
2. Макаренко С.И. Описательная модель сети связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 113–164. DOI:10.24411/2410-9916-2017-10205
3. Новиков С.Н. Подходы к моделированию функционирования сети связи большой размерности в условиях внешних деструктивных воздействий // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 79–87.
4. Новиков С.Н. Моделирование функционирования сети связи в условиях внешних деструктивных воздействий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. № 7. С. 203–220.
5. Новиков С.Н. Математическая модель функционирования современных систем телекоммуникаций в условиях внешних преднамеренных разрушающих воздействий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 9. С. 3–14.
6. Макаренко С.И. Время сходимости протоколов маршрутизации при отказах в сети // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 45–98. DOI:10.24411/2410-9916-2015-10203
7. Макаренко С.И. Метод обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 14–30. DOI:10.24411/2410-9916-2018-10302
8. 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 (69). С. 71–78.
9. Макаренко С.И. Усовершенствованный протокол маршрутизации OSPF, обеспечивающий повышенную устойчивость сетей связи // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 2. С. 82–90. DOI:10.31854/1813-324x-2018-2-82-90
10. Макаренко С.И. Усовершенствованный протокол маршрутизации EIGRP, обеспечивающий повышенную устойчивость сетей связи // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 3. С. 65–73. DOI:10.31854/1813-324x-2018-4-3-65-73
11. Cornely T., Oster G., Cherukuri R., Dykeman D. Private Network – Network Interface. Specification Version 1.1 (Relative to af-pnni-0055.000). New York: ATM Forum, 2002. 522 p. URL: www.broadband-forum.org/download/af-pnni-0055.001.pdf (дата обращения: 30.03.2020)
12. Новиков С.Н. Методы маршрутизации на цифровых широкополосных сетях связи. Часть 2. Новосибирск: СибГУТИ, 2008. 59 с.
13. Cisco PNNI Network Planning Guide for MGX and SES Products. Release 5.2. San Jose: Cisco Systems, 2005. 88 p. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/wan/mgx/mgx_8850/software/mgx_r5-2/data/pnni/network/planning/guide/ppg.pdf (дата обращения: 30.03.2020)
14. Михайлов Р.Л., Макаренко С.И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4(12). С. 69–79.
15. Yen J.Y. Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network // Management Science. 1971. Vol. 17. Iss. 11. PP. 712–716. DOI:10.1287/mnsc.17.11.712
16. Shier D.R. On algorithms for finding the k shortest paths in a network // Networks. 1979. Vol. 9. Iss. 3. PP. 195–214.
17. Aihara K. Approach to Enumerating Elementary Paths and Cutsets by Gaussian Elimination Method // Electronics & Communications in Japan. 1975. Vol. 58. Iss. 1. PP. 1–10.
18. Ahuja R.K., Mehlhorn K., Orlin J., Tarjan R.E. Faster algorithms for the shortest path problem // Journal of the ACM. 1990. Vol. 37. Iss. 2. PP. 213–223. DOI:10.1145/77600.77615
19. Anily S., Hassin R. Ranking the Best Binary Trees // SIAM Journal on Computing. 1989. Vol. 18. Iss. 5. PP. 882–892. DOI:10.1137/0218060
20. Eppstein D. Finding the k Shortest Paths // SIAM Journal on computing. 1998. Vol. 28. Iss. 2. PP. 652–673. DOI:10.1137/S0097539795290477
21. Althöfer I. On the K -Best Move in Computer Chess: Measuring the Similarity of Move Proposals // ICGA Journal. 1997. Vol. 20. Iss. 3. PP. 152–165. DOI:10.3233/ICG-1997-20303
22. Aljazzar H., Leue S. K^* : A heuristic search algorithm for finding the k shortest paths // Artificial Intelligence. 2011. Vol. 175. Iss. 18. PP. 2129–2154. DOI:10.1016/j.artint.2011.07.003
23. Канаев А.К., Лукичев М.М. Анализ различных подходов к формированию ранжированных множеств маршрутов на транспортной сети связи // Юбилейная 70-я всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню

радио (Санкт-Петербург, Россия, 21–29 апреля 2015). Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2015. С. 268–270.

24. Минович А. И., Романюк В. А. Маршрутизация в мобильных радиосетях: проблема и пути ее решения // Зв'язок. 2006. № 7. С. 49–55.

25. Поповский В.В., Лемешко А.В., Мельникова Л.И., Андрушко Д.В. Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях // Прикладная радиоэлектроника. 2005. Т. 4. № 4. С. 372–382. URL: http://alem.ucoz.ua/_ld/0/10_Lemeshko_PRE_20.pdf (дата обращения 30.03.2020)

26. Лемешко А.В., Козлова Е.В., Романюк А.А. Математическая модель отказоустойчивой маршрутизации, представленная алгебраическими уравнениями состояния MPLS-сети // Системи обробки інформації. 2013. № 2(109). С. 217–220.

27. Михайлов Р.Л. Помехозащищенность транспортных сетей связи специального назначения. Череповец: ЧВВИУРЭ, 2016. 128 с.

28. Михайлов Р.Л. Модели и алгоритмы маршрутизации в транспортной наземно-космической сети связи военного назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 52–82.

29. Luo M., Zeng Y., Li J., Chou W. An adaptive multi-path computation framework for centrally controlled network // Computer Networks. 2015. Vol. 83. PP. 30–44. DOI:10.1016/j.comnet.2015.02.004

30. Kalyanaraman H.T.K.S., Weiss A., Kanwar S., Gandhi A. BANANAS: A Framework for Explicit, Multipath Routing in the Internet // Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Future directions in network architecture. 2003. PP. 277–288. DOI:10.1145/944759.944766

31. Sheu S.T., Chuang Y.R. Alternative routing based network architecture (ARBNA) for ATM switches // IEICE transactions on communications. 2000. Vol. E83-B. Iss. 2. PP. 214–224.

32. Soncodi A.C. Signaling protocol for rerouting ATM connections in PNNI environments. Patent US, no. 6111881, 29.08.2000.

33. Иванов В.И. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 69–105.

34. Михайлов Р.Л. Описательные модели систем спутниковой связи как космического эшелона телекоммуникационных систем специального назначения. СПб.: Научно-технические технологии, 2019. 150 с.

35. Егунов М.М., Шувалов В.П. Анализ структурной надежности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54–60.

36. Грызунов В.В. Оценивание живучести неоднородных структур // Вестник СибГУТИ. 2011. № 1. С. 28–36.

37. Кузюрин Н.Н., Фомин С. А. Покрывание графов циклами и быстрое восстановление оптоволоконных сетей // Труды института системного программирования. 2004. № 5. С. 249–268.

38. Нижарадзе Т.З. Разработка и исследование модели алгоритма динамической маршрутизации для сетей GMPLS. Дис. ... канд. техн. наук. Вологда: Вологодский государственный технический университет, 2007. 161 с.

39. Громов Ю.Ю., Драчев В.О., Набатов К.А., Иванова О.Г. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография. М.: Издательство Машиностроение-1, 2007. 152 с.

40. Додонов А.Г., Ландэ Д.В. Живучесть информационных систем. К.: Наукова думка, 2011. 256 с.

41. Попков В.К. Математические модели связности. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2006. 460 с.

42. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Анализ и проектирование маршрутов передачи в корпоративных сетях. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 236 с.

43. Перепелкин Д.А. Динамическое формирование структуры и параметров линий связи корпоративной сети на основе данных о парных перестановках маршрутов // Информационные технологии. 2014. № 4. С. 52–60.

* * *

Improved Routing and Signaling Functions of PNNI Protocol for High Network Stability

S. Makarenko^{1, 2, 3} 

¹Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197376, Russian Federation

³Intel Group Corporation Ltd, St. Petersburg, 197372, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-45-59

Received 1st April 2020

Accepted 22nd April 2020

For citation: Makarenko S. Improved Routing and Signaling Functions of PNNI Protocol for High Network Stability. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(2):45–59. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-45-59

Abstract: *The improved routing and signaling functions of PNNI protocol is presents in the paper. The improved this function of PNNI protocol are to use topological network redundancy and create backup paths. This improved PNNI provides high network stability, if the network topology changes rapidly.*

Keywords: *network, routing protocol, network stability, network convergence time, PNNI.*

References

1. Makarenko S.I. Prospects and Problems of Development of Communication Networks of Special Purpose. *Systems of Control, Communication and Security*. 2017;2:18–69. (in Russ.) DOI:10.24411/2410-9916-2017-10202
2. Makarenko S.I. Descriptive Model of a Special Purpose Communication Network. *Systems of Control, Communication and Security*. 2017;2:113–164. (in Russ.) DOI:10.24411/2410-9916-2017-10205
3. Novikov S.N. The Approach to Modeling of a Large-Dimension Network Functioning in Conditions of External Destructive Effects. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2017;3(4):79–87. (in Russ.)
4. Novikov S.N. Modeling of the performance of network communication in terms of external destructive influences. *Interekspo GEO-Sibir*. 2018;7:203–220. (in Russ.)
5. Novikov S.N. Mathematical model of functioning of modern telecommunication systems in the conditions of external deliberate destructive influences. *Interekspo GEO-Sibir*. 2019;9:3–14. (in Russ.)
6. Makarenko S.I. Convergence Time of IGP Routing Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*. 2015;2:45–98. (in Russ.) DOI:10.24411/2410-9916-2015-10203
7. Makarenko S.I. Stability method of telecommunication network with using topological redundancy. *Systems of Control, Communication and Security*. 2018;3:14–30. (in Russ.) DOI:10.24411/2410-9916-2018-10302
8. Tsvetov K.U., Makarenko S.I., Mikhailov R.L. Forming of Reserve Paths Based on Dijkstra's Algorithm in the Aim of the Enhancement of the Stability of Telecommunication Networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*. 2014;69(2):71–78. (in Russ.)
9. Makarenko S.I. The Improved OSPF Protocol for High Network Stability. *Proc. of Telecom. Universities*. 2018;4(2):82–90. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324x-2018-2-82-90
10. Makarenko S.I. The Improved EIGRP Protocol for High Network Stability. *Proc. of Telecom. Universities*. 2018;4(3):65–73. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2018-4-3-65-73
11. Cornely T., Oster G., Cherukuri R., Dykeman D. Private Network – Network Interface. Specification Version 1.1 (Relative to af-pnni-0055.000). New York: ATM Forum; 2002. Available from: www.broadband-forum.org/download/af-pnni-0055.001.pdf [Accessed 30th March 2020]
12. Novikov S.N. *Routing Methods on Digital Broadband Communication Networks. Part 2*. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Information Science; 2008. (in Russ.)
13. Cisco PNNI Network Planning Guide for MGX and SES Products. Release 5.2. San Jose: Cisco Systems; 2005. Available from: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/wan/mgx/mgx_8850/software/mgx_r5-2/data/pnni/network/planning/guide/ppg.pdf [Accessed 30th March 2020]
14. Mikhailov R.L., Makarenko S.I. Estimating Communication Network Stability under the Conditions of Destabilizing Factors Affecting it. *Radio and telecommunication systems*. 2013;4(12):69–79. (in Russ.)
15. Yen J.Y. Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network. *Management Science*. 1971;17(11):712–716. DOI:10.1287/mnsc.17.11.712
16. Shier D.R. On algorithms for finding the k shortest paths in a network. *Networks*. 1979;9(3):195–214.
17. Aihara K. Approach to Enumerating Elementary Paths and Cutsets by Gaussian Elimination Method. *Electronics & Communications in Japan*. 1975;58(1):1–10.
18. Ahuja R.K., Mehlhorn K., Orlin J., Tarjan R.E. Faster algorithms for the shortest path problem *Journal of the ACM*. 1990;37(2):213–223. DOI:10.1145/77600.77615
19. Anily S., Hassin R. Ranking the Best Binary Trees. *SIAM Journal on Computing*. 1989;18(5):882–892. DOI:10.1137/0218060
20. Eppstein D. Finding the k Shortest Paths. *SIAM Journal on Computing*. 1998;28(2):652–673. DOI:10.1137/S0097539795290477
21. Althöfer I. On the K -Best Move in Computer Chess: Measuring the Similarity of Move Proposals. *ICGA Journal*. 1997;20(3):152–165. DOI:10.3233/ICG-1997-20303
22. Aljazzar H., Leue S. K^* : A heuristic search algorithm for finding the k shortest paths. *Artificial Intelligence*. 2011; 175(18):2129–2154. DOI:10.1016/j.artint.2011.07.003
23. Kanaev A.K., Lukichev M.M. Analysis of Various Approaches to the formation of ranked sets of routes on a Transport Communication Network. 70th Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference Dedicated to Radio Day, 21–29 April 2015, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"; 2015. p.268–270. (in Russ.)
24. Minochkin A.I., Romaniuk V.A. Routing in Mobile Radio Networks: the Problem and Its Solution. *Zv'iazok*. 2006;7:49–55 (in Russ.)
25. Popovskii V.V., Lemeshko A.V., Melnikova L.I., Andrushko D.V. Overview and Comparative Analysis of the Main Models and Algorithms of Multi-Path Routing in Multiservice Telecommunication Networks. *Prikladnaia radioelektronika*. 2005;4(4): 372–382. (in Russ.) Available from: http://alem.ucoz.ua/_ld/0/10_Lemeshko_PRE_20.pdf [Accessed 30th March 2020].

26. Lemeshko O.V., Kozlova H.V., Romanyuk A.O. A Mathematical Model of Fault-tolerant Routing, Presented Algebraic Equations of MPLS-Network State. *Sistemy obrobki informacii*. 2013;109(2):217–220. (in Russ.)
27. Mikhailov R.L. *Noise Immunity of Transport Networks for Special Purposes*. Cherepovets: The Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics; 2016. 128 p. (in Russ.)
28. Mikhailov R.L. Routing models and algorithms of transport terrestrial-cosmic military network. *Systems of Control, Communication and Security*. 2015;3:52–82. (in Russ.)
29. Luo M., Zeng Y., Li J., Chou W. An adaptive multi-path computation framework for centrally controlled networks. *Computer Networks*. 2015;83:30–44. DOI:10.1016/j.comnet.2015.02.004
30. Kalyanaraman H.T.K.S., Weiss A., Kanwar S., Gandhi A. BANANAS: A Framework for Explicit, Multipath Routing in the Internet. *Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Future directions in network architecture*. 2003. p.277–288. DOI:10.1145/944759.944766
31. Sheu S.T., Chuang Y.R. Alternative routing based network architecture (ARBNA) for ATM switches. *IEICE transactions on communications*. 2000;83(2):214–224.
32. Soncodi A.C. *Signaling protocol for rerouting ATM connections in PNNI environments*. Patent US, no. 6111881, 29.08.2000.
33. Ivanov V.I. Algorithm of centralized multipath routing with load balancing for nongeostationary telecommunication satellite system with intersatellite links. *Systems of Control, Communication and Security*. 2018;3:69–105. (in Russ.)
34. Mihajlov R.L. *Descriptive models of satellite communication systems as a space echelon of special-purpose telecommunications systems*. St. Petersburg: Naukoemkie tehnologii Publ.; 2019. (in Russ.)
35. Egunov M.M., Shuvalov V.P. The Analysis of Structural Reliability of Traffic Nets. *Vestnik SibGUTY*. 2012;1: 54–60. (in Russ.)
36. Gryzunov V.V. The Estimation of Nonuniform Structures' Reliability. *Vestnik SibGUTY*. 2011;1:28–36. (in Russ.)
37. Kuziurin N.N., Fomin S.A. Covering Graphs by Cycles and Quick Restoration of Fiber Optic Networks. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2004;5:249–268. (in Russ.)
38. Nizharadze T.Z. *The Model of Dynamic Routing Algorithm for GMPLS Networks, Research and Development*. Ph.D. Tesis. Vologda: Vologda State University; 2007. 161 p. (in Russ.)
39. Gromov Ju.Ju., Drachev V.O., Nabatov K.A., Ivanova O.G. *Synthesis and Analysis Net Systems Reliability*. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ.; 2007. 152 p. (in Russ.)
40. Dadonov A.G., Lande D.V. *Survivability of the Information Systems*. Kiev: Naukova Dumka Publ.; 2011. 256 p. (in Russ.)
41. Popkov V.K. *Mathematical Models of Connectivity*. Novosibirsk: Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. 460 p. (in Russ.)
42. Korjachko V.P., Perepelkin D.A. *The Analysis and Designing of Routes at Transmission in Corporate Networks*. Moscow: Goriachaia Liniia – Telecom Publ., 2012, 236 p. (in Russ.)
43. Perepelkin D.A. Dynamic Corporate Network Structure and Communication Links Loading Formation Based on Routes Pairs Permutations Data. *Informatsionnye tehnologii*. 2014;4:52–60. (in Russ.).

Сведения об авторе:

МАКАРЕНКО
Сергей Иванович

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, профессор кафедры информационной безопасности Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), заместитель генерального директора на научной работе – главный конструктор ООО «Корпорация «Интел групп», mak-serg@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9385-2074>