

УДК 004.724.4

Модели и алгоритмы маршрутизации в транспортной наземно-космической сети связи военного назначения

Михайлов Р. Л.

Постановка задачи: применение современных технологий организации пакетных сетей передачи данных в транспортных наземно-космических сетях связи военного назначения актуализирует вопросы обеспечения устойчивости их функционирования, оказывающей существенное влияние на своевременность информационного обмена в системах управления войсками и оружием. Показано, что известные протоколы маршрутизации не обеспечивают требуемый уровень устойчивости связи в условиях целенаправленного воздействия внешних деструктивных факторов и, следовательно, существует необходимость их усовершенствования. **Целью работы** является повышение устойчивости транспортных наземно-космических сетей связи военного назначения путем разработки моделей и алгоритмов маршрутизации информационных потоков в условиях целенаправленного воздействия внешних деструктивных факторов. **Используемые методы:** в работе нашли применение методы теории вероятности, теории надежности, теории марковских случайных процессов и теории графов. **Новизной** работы является введение показателя устойчивости связи, учитывающего зависимость между эффектом от воздействия внешних деструктивных факторов в виде отказа каналов связи и параметрами сетевого уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем, а также критерий выбора временных параметров сигнализации в целях повышения этого показателя. **Результат:** проведенное моделирование показало, что использование разработанных алгоритмов позволяет обеспечить требуемый уровень устойчивости наземно-космических сетей связи военного назначения, при этом эффективность их использования по выбранному в работе показателю достигает 80%. **Практическая значимость** работы заключается в доведении разработанного научно-методического аппарата до программной модификации протокола маршрутизации PNNI для математического обеспечения коммутатора пакетов

Ключевые слова: система спутниковой связи, транспортная сеть связи, устойчивость связи, маршрутизация, ATM, PNNI.

Актуальность

В настоящее время в Вооруженных Силах Российской Федерации (ВС РФ) определены основные задачи и направления развития системы военной связи (СВС) ВС РФ. Особенности построения транспортной сети СВС ВС РФ являются использование в ее составе каналов связи (КС) космического эшелона в качестве резерва при невозможности передачи данных через инфраструктуру наземного эшелона и, следовательно, ее функционирование на основе технологий, используемых в военных системах спутниковой связи (ВССС). Вместе с тем, принципы и основные технологические решения современных ВССС были разработаны до 1995 года и не в полной мере отвечают современным требованиям, предъявляемым в ВС РФ. Имеется серьезное технологическое отставание ВССС от аналогов ведущих зарубежных стран, в первую очередь, по пропускной способности и видам предоставляемых услуг. Одним из основных технологических направлений совершенствования ВССС является внедрение современных сетевых телекоммуникационных технологий в состав перспективных космических аппаратов связи (КАС) и оборудования земных станций (ЗС). В качестве

технологического решения по обеспечению коммутации пакетов и каналов в ВССС впервые предполагается использование АТМ-маршрутизатора, позволяющего реализовать функции как коммутации пакетов, так и функции коммутатора цифровых каналов для передачи абонентского трафика. Однако внедрение современных технологий построения транспортных сетей связи наряду с неоспоримыми преимуществами влечет за собой появление дополнительных уязвимостей СВС ВС РФ, связанных с функционированием в условиях целенаправленных дестабилизирующих воздействий. Одной из характеристик информационного обмена в системе управления войсками и оружием (СУВО) является своевременность передачи трафика, зависящая, в том числе, от устойчивости СВС ВС РФ. Вместе с тем, снижение устойчивости основы СВС ВС РФ, а именно транспортной наземно-космической сети связи (ТНКСС), в условиях, когда применение средств огневого поражения против КАС и ЗС маловероятно, связано с воздействием средств радиоэлектронного противоборства (РЭП) [1]. В этих условиях протокол маршрутизации PNNI (Private Network-to-Network Interface – частный межсетевой интерфейс), входящий в состав стека АТМ (Asynchronous Transfer Mode – асинхронный метод передачи) не сможет обеспечить выполнение требований по своевременности информационного обмена, предъявляемых к СВС ВС РФ.

Вопросы маршрутизации рассмотрены в работах Ададунова С.Е., Бертсекаса Д., Вишневого В.М., Дейкстры Э.В., Косякова Е.Н., Назарова А.И., Новикова С.Н., Сычева К.И. Методическим аспектам оценивания и повышения устойчивости связи посвящены работы Боговика А.В., Гречишников Е.В., Дадонова А.Г., Игнатова В.В., Исакова Е.Е., Кучерявого А.Е., Ландэ Д.В., Нетеса В.А., Стекольников В.Ю., Попкова В.К., при этом в более узкой области помехозащищенности (радиоэлектронного противоборства) исследования проводились Антоновичем П.И., Борисовым В.И., Владимировым В.И., Зинчуком В.М., Комаровичем В.Ф., Коцыняком М.А., Куприяновым А.И., Липатниковым В.А., Стародубцевым Ю.И., Чудновым А.М. Задача разработки элементов научно-методического аппарата повышения устойчивости связи на сетевом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) нашла свое отражение в работах Бабусенко С.И., Букова А.А. и Паршуткина А.В., при этом специфика ТНКСС СВС ВС РФ, связанная с технологическими решениями в области спутниковой связи, не учитывалась.

Таким образом, работа преследует достижение актуальной цели, состоящей в повышении устойчивости ТНКСС СВС ВС РФ в условиях воздействия средств РЭП.

Постановка задачи

В течение продолжительного промежутка времени под устойчивостью связи понималась совокупность трех свойств: надежности, живучести и помехоустойчивости [2]. Авторы монографии [2] указывали, что применение интегральной категории устойчивости не предполагает ликвидации составляющих ее понятий. При этом надежность отражает влияние на

работоспособность системы главным образом внутрисистемного фактора – случайных отказов техники, а живучесть же характеризует устойчивость системы связи против действия причин, лежащих вне системы и приводящих к разрушениям или значительным повреждениям некоторой части ее элементов. Подчеркивалось, что надежность и живучесть – существенно различные понятия и самостоятельные проблемы, требующие своих решений при разработке и совершенствовании систем и сетей связи [3].

В работе [4], авторами давалось следующее определение: «Устойчивость – способность сети сохранять работоспособное состояние во времени и в условиях, создаваемых воздействиями внешних и внутренних деструктивных факторов (ДФ). При этом пояснялось, что устойчивость характеризуется свойствами надежности и живучести. Далее указывалось, что свойство надежности должно обеспечивать функционирование сети связи и ее элементов в условиях действия внутренних непреднамеренных (случайных) ДФ, а живучесть – свойство сети сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях, создаваемых воздействием внешних ДФ [4].

В работе [5] приводятся определения понятий устойчивости, целостности и безопасности единой сети связи (СС), используемых в законах «О техническом регулировании» (2002 г.) и «О связи» (2003 г.). В частности, в ней дается следующее определение: «Устойчивость функционирования единой сети электросвязи – свойство сети связи выполнять свои функции при воздействии внешних дестабилизирующих факторов».

В настоящее время требования к устойчивости функционирования сетей электросвязи, входящих в состав сети связи общего пользования, и методы их проверки установлены в ГОСТ 5311-2008 [6]. В данном нормативном документе приведены следующие основные определения.

Устойчивость функционирования сети электросвязи – способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов [6].

Дестабилизирующий фактор – воздействие на сеть электросвязи, источником которого является физический или технологический процесс внутреннего или внешнего по отношению к сети электросвязи характера, приводящее к выходу из строя элементов сети [6].

Коэффициент готовности – вероятность того, что объект находится в работоспособном состоянии в любой момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается [6].

Надежность сети электросвязи – свойство сети электросвязи сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях воздействия внутренних дестабилизирующих факторов (т. е. сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения и технического обслуживания) [6].

Внутренний дестабилизирующий фактор – дестабилизирующий фактор, источник которого расположен внутри сети электросвязи или ее элементов [6].

Живучесть сети электросвязи – свойство сети электросвязи сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях, создаваемых воздействиями внешних дестабилизирующих факторов [6].

Внешний дестабилизирующих факторов – дестабилизирующий фактор, источник которого расположен вне сети электросвязи [6].

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять им свои функции, соответствует требованиям или нормам [6].

Среднее время между отказами – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки [6].

Направление связи (основное направление связи) – совокупность линий передачи и узлов связи, обеспечивающая связь между двумя пунктами сети для обеспечения деятельности органов государственного управления, обороны, безопасности, охраны правопорядка, мобилизационной готовности при чрезвычайных ситуациях [6].

Вероятность связности (связность) направления электросвязи – вероятность того, что на заданном направлении электросвязи существует хотя бы один путь, по которому возможна передача информации с требуемым качеством и объемом [6].

Граф сети связи – математическая модель сети электросвязи, представляющая собой совокупность вершин (узлов связи) и соединяющих их ребер (линий связи) [6].

Элемент (объект) сети электросвязи – отображаемые на графе сети электросвязи вершинами и ребрами узлы связи и соединяющие их линии (совокупность линий) связи [6].

Вместе с тем, как показано в работе [7], устойчивость связи, являясь одним из основных свойств СВС, характеризуется некоторыми терминологическими отличиями в ходе своей оценке. Так, в соответствии с руководящими документами, в качестве внешних ДФ рассматриваются отдельно обычное и ядерное оружие противника, а также естественные и преднамеренные помехи. Специфика оценки устойчивости систем военной связи включает в себя:

Живучесть – способность СВС обеспечивать управление войсками, силами и оружием в условиях воздействия обычного и ядерного оружия противника.

Помехоустойчивость – способность СВС обеспечивать управление войсками, силами и оружием в условиях воздействия естественных помех.

Помехозащищенность – способность СВС обеспечивать управление войсками, силами и оружием в условиях воздействия преднамеренных помех противника.

Надежность – способность СВС обеспечивать связь, сохраняя во времени значения эксплуатационных показателей в пределах, соответствующих условиям эксплуатации, технического обслуживания восстановления и ремонта.

В работе [8] показано место устойчивости СВС в общей системе управления войсками и оружием (рис. 1).

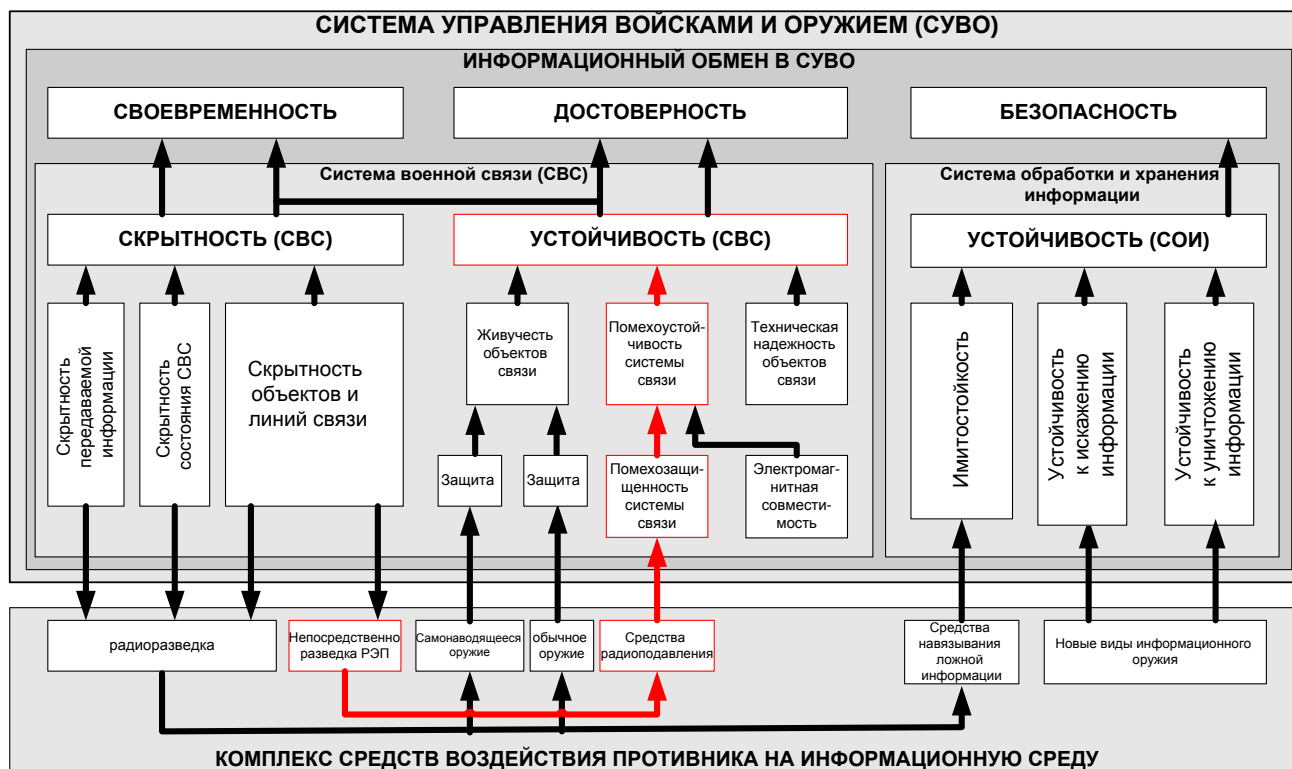


Рис. 1. Место устойчивости СВС в системе управления войсками и оружием

В работе [7] на основе анализа действующего в настоящее время ГОСТа [6], а также исследований других авторов показано, что показателем устойчивости связи является значение вероятности связности информационного направления связи (ИНС) $P_{св}$, под которым понимается вероятность того, что на заданном направлении существует хотя бы один путь, по которому возможна передача информации с требуемым качеством (QoS) и объемом:

$$P_{св} = P(k_{QoS} \geq 1 \mid \{Q_k\} \in \{Q_{\text{треб}}\}), \quad (1)$$

где k_{QoS} – количество работоспособных путей на заданном ИНС, обеспечивающих заданное качество обслуживания QoS; Q_k – качество обслуживания, обеспечиваемое путями (путем) на заданном ИНС; $Q_{\text{треб}}$ – требуемый уровень качества обслуживания.

Кроме того, в работах [7, 9, 10] для характеристики устойчивости ТНКСС СВС ВС РФ предложен показатель вероятности своевременной доставки пакета, проведен анализ методик расчета этого показателя для транспортных СС, осуществляющих передачу информационного трафика в соответствии с технологией АТМ, и предложено следующее аналитическое выражение:

$$P_{\text{сд}} = P_{\text{пр}} K_{\Gamma} P_{\text{св}} \left| T_{\text{дост}} \leq T_{\text{дост}}^{\text{зад}} \right., \quad (2)$$

где $P_{\text{пр}}$ – вероятность безошибочной доставки пакета, $P_{\text{св}}$ – вероятность связности ИНС, K_{Γ} – коэффициент готовности ИНС, $T_{\text{дост}}^{\text{зад}}$ – заданное значение максимального времени доставки пакета.

Вероятность безошибочной доставки пакета $P_{\text{пр}}$ определяется способностью применяемой системы помехоустойчивого кодирования обнаруживать и исправлять ошибки, возникающие при приеме информационного пакета. В рамках работы сделано допущение о том, что ошибки, возникающие при приеме пакета, будут обнаруживаться и исправляться с помощью системы помехоустойчивого кодирования в полном объеме, т.е. $P_{\text{пр}}=1$.

В соответствии с выражением (2) вероятность связности ИНС $P_{\text{св}}$ служит для описания способности структуры СС обеспечить связность графа, ее формализующего, в условиях исключения отдельных ребер (подавления отдельных КС) или вершин (приведение в неработоспособное состояние узлов связи) [7]. Кроме того, значение вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$ зависит от типа ИНС, построенного в СС используемым протоколом маршрутизации. Так, в случае если ИНС представляет собой последовательное соединение элементов (рис. 2), то, применяя известные выражения из теории надежности, получим вероятность связности ИНС $P_{\text{св}1}$, с учетом вероятности работоспособного состояния отдельных элементов $P_{\text{раб.эл.}v}$ [11]:

$$P_{\text{св}1} = \prod_{v=1}^{z_1} P_{\text{раб.эл.}v}. \quad (3)$$

Под элементом соединения понимается канал или узел связи, имеющий собственные значения устойчивости к воздействию внешних и внутренних ДФ, определяемых показателем вероятности работоспособного состояния $P_{\text{раб.эл.}v}$ в соответствии с методикой [7].

$$P_{\text{раб.эл.}v} = (1 - P_{\text{ИТВ}v})(1 - P_{\text{РЭП}v})(1 - P_{\text{ФП}v})(1 - P_{\text{отк}v}), \quad (4)$$

где $P_{\text{ИТВ}i}$ – вероятность отказа элементов ИНС вследствие информационно-технических воздействий (ИТВ) [12]; $P_{\text{РЭП}i}$ – вероятность отказа вследствие воздействия средств РЭП количества КС в ИНС большего, либо равного величине реберной связности графа, формализующего ИНС; $P_{\text{ФП}i}$ – вероятность физического поражения узлов связи ИНС большего, либо равного величине вершинной связности графа, формализующего ИНС; $P_{\text{отк}i}$ – вероятность отказа элементов ИНС вследствие воздействия внутренних ДФ и естественных процессов надежности.

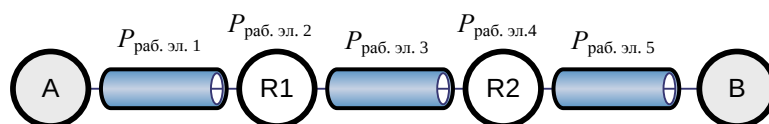


Рис. 2 ИНС с последовательным соединением элементов

В случае независимости элементов и возможности осуществлять резервирование путей, ИНС имеет вид, представленный на рис. 3.

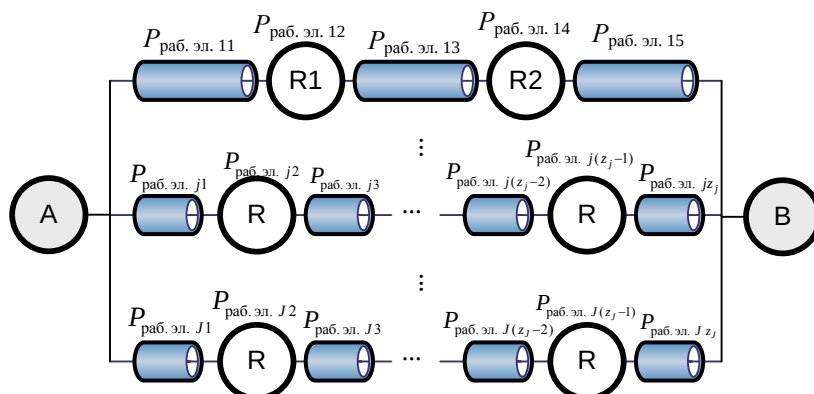


Рис. 3 ИНС с параллельно-последовательным соединением элементов

В случае независимости элементов путей в ИНС и отсутствии пересечений, применяя известные выражения из теории надежности, получим суммарную вероятность связности для такой структуры ИНС $P_{св\ 2}$ [11]:

$$P_{св\ 2} = 1 - \prod_{j=1}^J \left(1 - \prod_{v=1}^{z_j} P_{раб.\ эл.\ v} \right). \quad (5)$$

В случае смешанной структуры путей, в том числе при наличии их пересечений, получим структуру, представленную на рис. 4. Для такой структуры путей в составе ИНС применяется его разбиение на отдельные последовательно объединенные области, с последующим вычислением вероятности связности $P_{св}$ сначала внутри такой области, затем в целом за ИНС.

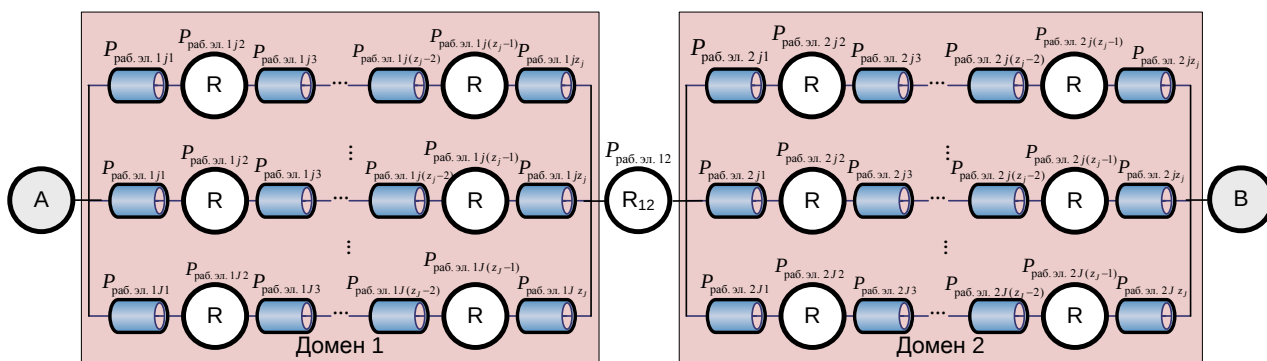


Рис. 4 ИНС со смешанной структурой

На практике вид, представленный на рис. 4, имеют ИНС, используемые протоколами PNNI в сетях MPLS (ATM, ASON, IP-MPLS), разбитых на

множество доменов маршрутизации. При этом каждая область соответствует отдельному домену, а маршрутизаторы, в которых пересекаются пути, соответствуют граничным маршрутизаторам. Дополнительные пути в каждом домене для схем соединений на рис. 3 и рис. 4 соответствуют принципу резервирования соединений 1+1 или 1:1 [13].

На основе известных выражений из теории надежности с учетом выражений (4) и (5), получим суммарную вероятность связности для такой структуры ИНС $P_{св3}$:

$$P_{св3} = \prod_{i=1}^d \left(1 - \prod_{j=1}^{J_i} \left(1 - \prod_{v=1}^{z_j} P_{\text{раб. эл. } v} \right) \right) \cdot \prod_{i=1}^{d-1} P_{\text{раб. эл. } v}, \quad (6)$$

где первая часть произведения определяет вероятность связности доменов, а вторая – вероятность связности граничных маршрутизаторов.

Существенную роль в определении вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ играют временные параметры функционирования ИНС и его реакции на отказ элементов, определяемые коэффициентом готовности ИНС K_{Γ} . Выражение для коэффициента готовности ИНС должно определять не только долю времени работоспособного состояния ИНС при отказе его отдельных элементов с учетом времени на восстановление элементов, но и время реакции протокола сигнализации на диагностику отказа и восстановление связи (или реконфигурацию). Кроме того, для современных протоколов маршрутизации само понятие отказа КС несколько отличается от принятого. Протоколы реагируют не только на полную утерю работоспособности элементом, но и на частичное понижение его характеристик, приводящее к превышению времени доставки пакета заданного значения $T_{\text{дост}}^{\text{зад}}$. Таким образом, особенности функционирования СС на сетевом уровне ЭМВОС при маршрутизации информационных потоков проявляются в форме зависимости значения коэффициента готовности ИНС K_{Γ} от временных интервалов сигнализации и временных параметров отказов КС:

$$K_{\Gamma} = F(T_{\text{диагн}}, T_{\text{ож}}, T_{\text{рек}}, T_{\text{отк КС}}), \quad (7)$$

где $T_{\text{отк КС}}$ – среднее время работы между отказами КС, $T_{\text{диагн}}$ – время диагностики отказа ИНС; $T_{\text{ож}}$ – время ожидания восстановления связи в ИНС, $T_{\text{рек}}$ – время реконфигурации путей в ИНС.

С учетом вышесказанного, вербально задача работы формулируется как повышение устойчивости ТНКСС СВС ВС РФ по показателю вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ за счет разработки НМА маршрутизации информационных потоков, позволяющих повысить коэффициент готовности ИНС. В математическом виде задача формализуется следующим образом.

Дано:

$$P_{\text{сд}} = P_{\text{пр}} K_{\Gamma} P_{\text{св}} \Big| T_{\text{дост}} \leq T_{\text{дост}}^{\text{зад}},$$

$$E_y = \left(\frac{P_{\text{сд}2}}{P_{\text{сд}1}} - 1 \right) \times 100\% = \left(\frac{K_{\Gamma 2}}{K_{\Gamma 1}} - 1 \right) \times 100\%,$$

$$K_{\Gamma} = F(T_{\text{диагн}}, T_{\text{ож}}, T_{\text{рек}}, T_{\text{отк КС}}),$$

$$P_{\text{сд}}^{\text{зад}} = 0,9 \Big| T_{\text{дост}}^{\text{зад}} = 3 \text{ с.}$$

Найти:

$$(T_{\text{диагн}}, T_{\text{ож}}, T_{\text{рек}}) \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{сд}} \geq P_{\text{сд}}^{\text{зад}} \Big| T_{\text{дост}}^{\text{зад}} \leq 3 \text{ с.} \\ E_y \rightarrow \max \end{array} \right. , \quad (8)$$

где $P_{\text{сд}}$ – вероятность своевременной доставки пакета, $T_{\text{дост}}$ – максимальное время доставки пакета, $T_{\text{дост}}^{\text{зад}}$ – заданное значение максимального времени доставки пакета, $P_{\text{сд}1}$ – вероятность своевременной доставки пакета без использования разработанных алгоритмов, $P_{\text{сд}2}$ – вероятность своевременной доставки пакета с использованием разработанных алгоритмов, $P_{\text{св}}$ – вероятность связности ИНС, $P_{\text{пр}}$ – вероятность безошибочной доставки пакета; K_{Γ} – коэффициент готовности ИНС, $K_{\Gamma 1}$ – коэффициент готовности ИНС без использования разработанных алгоритмов, $K_{\Gamma 2}$ – коэффициент готовности ИНС с использованием разработанных алгоритмов, E_y – показатель эффективности использования разработанных алгоритмов, $T_{\text{отк КС}}$ – среднее время между отказами КС, $T_{\text{диагн}}$ – время диагностики отказа ИНС; $T_{\text{ож}}$ – время ожидания восстановления связи в ИНС, $T_{\text{рек}}$ – время реконфигурации путей в ИНС.

Показатель эффективности использования разработанных алгоритмов E_y отражает прирост значения коэффициент готовности ИНС K_{Γ} вследствие использования разработанных элементов НМА маршрутизации информационных потоков.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи.

- 1) Разработка модели функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП.
- 2) Разработка модели функционирования межузловое соединения ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП.
- 3) Разработка алгоритма маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности ТНКСС.
- 4) Разработка алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП.

Модель функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП

В рамках разработанной модели оценено влияние изменения сигнально-помеховой обстановки на каналные и сетевые показатели КС в условиях использования адаптивных схем выбора вида модуляции сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в каналах спутниковой связи DVB-S2.

Особенностью реализации протокола DVB-S2 для каналов спутниковой связи является наличие режима ACM (Adaptive Coding and Modulation) для адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в зависимости от отношения сигнала к шуму и помехе (ОСШП) на входе приемника. Это позволяет осуществлять гибкое регулирование параметрами кодирования и модуляции передатчика в зависимости от значения ОСШП на входе приемника при заданном уровне достоверности приема. При этом параметры кодирования и модуляции могут изменяться от кадра к кадру. В стандарте DVB-S2 предусматриваются следующие скорости кодирования FEC (1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10) при ёмких видах модуляции (QPSK, 8-PSK, 16-APSK и 32-APSK). Для защиты от ошибок приема сигналов в стандарте DVB-S2 используется перемежение данных и наложение двухуровневого кода для прямой коррекции ошибок FEC. В качестве внутреннего кода используется код LDPC, в качестве внешнего – код БЧХ (код Боуза-Чоудхури-Хоквенгема). Таким образом, благодаря возможности адаптивного выбора вида модуляции и скоростей кодирования каналы могут работать в широком диапазоне значений ОСШП с показателем спектральной эффективности, близким к теоретически достижимому. Так, канал связи DVB-S2, может работать при ОСШП от -2,4 дБ (модуляция QPSK, скорость кода $R=1/4$) до 16 дБ (модуляция 32-APSK, скорость кода $R=9/10$), при этом для этого канала доступны показатели эффективности спектра от 0,5 до 4,5 (бит/с)/Гц. Схемы адаптивного выбора вида модуляции и скорости кодирования для DVB-S2 приведены в таблице 1 по данным, представленным в работах [14-19].

В работах [20, 21] показано, что отображением развития радиоэлектронного конфликта на параметры канала связи является периодическое изменение его пропускной способности. Для формализованного описания периодического изменения пропускной способности канала связи в работах [20, 21] предложено использовать зависимость показателя отношения сигнал к сумме шум и помеха формализованную выражением:

$$q(t) = \left[\begin{array}{l} F_1(q_{\min}, F_s, P_j, \gamma, t_{\text{сск}}, t_{\text{РП}}, t) \\ F_2(q_{\min}, F_s, L, w_{ji}, \varphi_{ji}, t_{\text{сск}}, t_{\text{РП}}, t) \end{array} \right] P_E = P_{E \max} \quad (9)$$

где $q_{\min}$ – значение ОСШП в КС, при котором невозможна передача информации; F_s – полоса частот СРС; P_j – мощность помехи; γ – коэффициент, характеризующий часть полосы частот ВРС, занимаемую помехой $0 \leq \gamma \leq 1$; P_E – средняя вероятность ошибки на бит; L – число немодулированных гармонических колебаний; w_{ji} и φ_{ji} – частота и начальная фаза i -го

гармонического колебания; $t_{скз}$ – время, необходимое для смены сигнально кодовых созвездий; $t_{рп}$ – время реакции помех.

В качестве канальных показателей рассматривались пропускная способность и время задержки при передаче. В качестве сетевых показателей рассматривались метрика КС, а также метрика виртуальных путей (VPC – Virtual Path Connect), создаваемых протоколом PNNI в магистральных спутниковых каналах. В качестве воздействия средств РЭП рассматривалась наихудшая помеха, определяемая по показателю средней вероятности ошибки на бит. Под отказом КС понимается ухудшение ОСШП вследствие воздействия средств РЭП ниже заданной в технологии DVB-S2 критической величины ($q_{min} = -2,35$ дБ), при котором еще обеспечивается достоверный прием сигнала. При отказе VPC суммарная метрика КС, входящих в его состав, не позволяет осуществлять передачу пакетов с заданным уровнем времени задержки.

Схема взаимосвязи аналитических соотношений в модели функционирования маршрутизатора в условиях изменения метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП представлена на рис. 5. Более подробно указанная модель, а также исследования на ее основе приведены в работах [22].

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы.

- 1) Изменение ОСШП напрямую влияет на изменение параметров сетевого уровня – метрик КС и метрик VPC.
- 2) Отказы отдельных КС и VPC, характеризующиеся средним временем между отказами КС $T_{отк\ КС}$ и VPC $T_{отк\ VPC}$ соответственно, приводят к отказу соединения АТМ, при этом суммарный поток отказов (рис. 6) характеризуется плотностью вероятности распределения времени между отказами соединения АТМ $f^*(T_{отк\ АТМ})$, которая может быть аппроксимирована экспоненциальной зависимостью (рис. 7).
- 3) При рассмотрении наиболее вероятных классов помех в качестве воздействия средств РЭП, наибольшее влияние на количественные параметры суммарного потока отказов соединения АТМ будут оказывать отказы КС.

Экспоненциальная зависимость плотности вероятности распределения времени между отказами соединения АТМ $f^*(T_{отк\ АТМ})$ и тот факт, что данные отказы вызваны, в первую очередь, отказами КС, позволили сделать допущение о пуассоновском процессе отказов соединения АТМ вследствие воздействия средств РЭП, при условии ординарности отказов КС. Данное допущение позволяет обосновать переход от соотношения временных интервалов сигнализации к вероятностным параметрам марковской модели межузлового соединения ТНКСС.

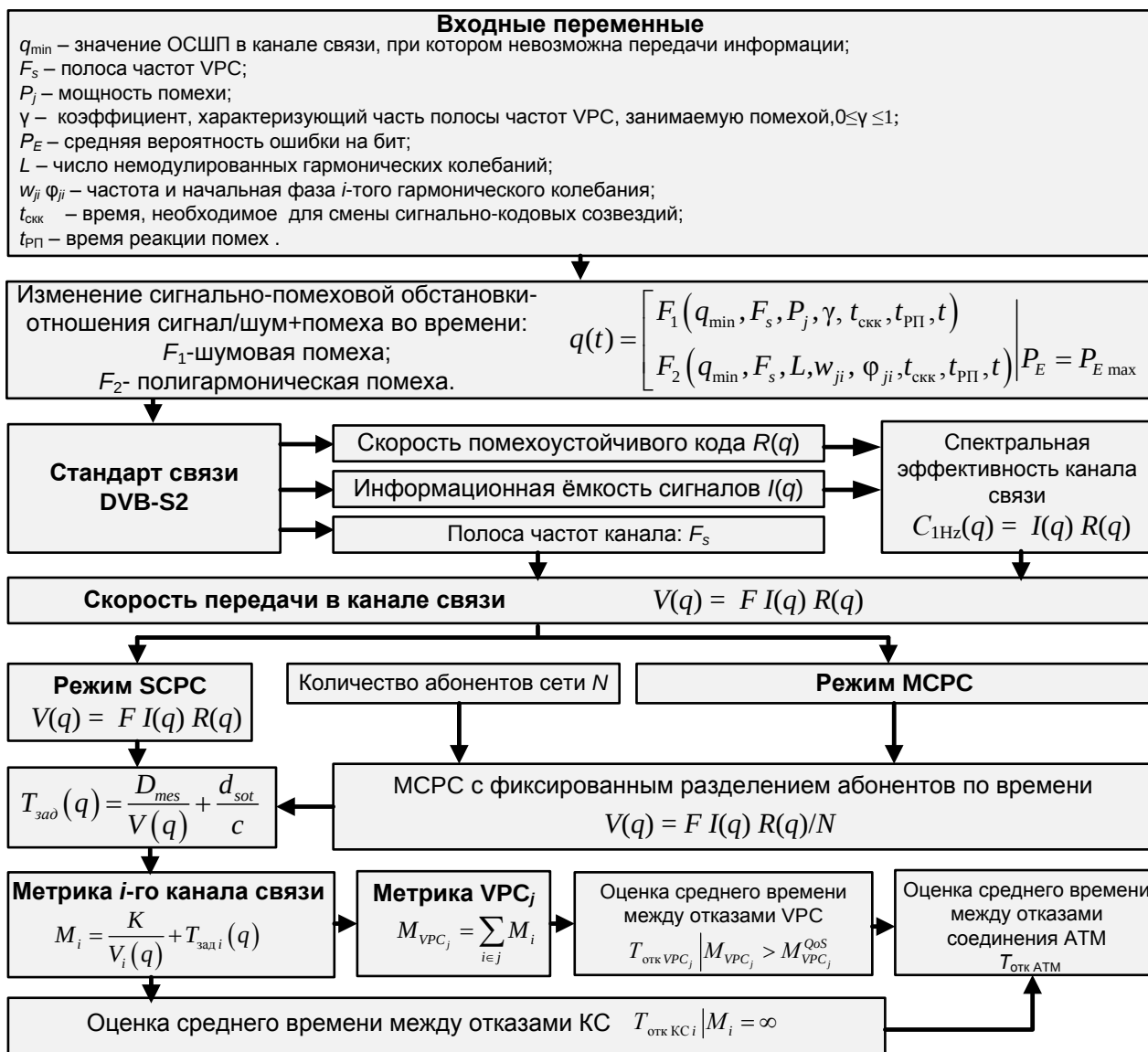


Рис. 5. Схема взаимосвязи аналитических соотношений в модели функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП

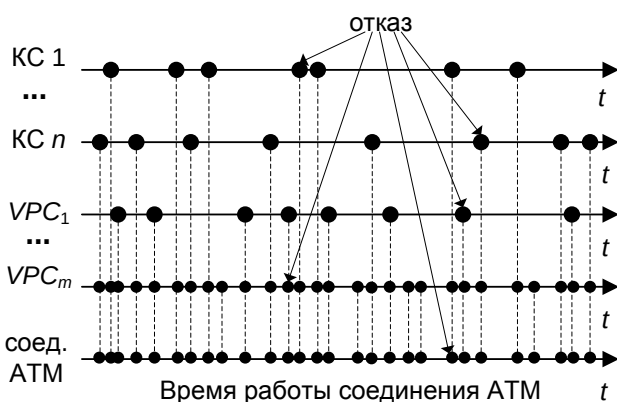


Рис. 6. Моменты отказов отдельных КС и VPC, приводящие к отказу соединения АТМ

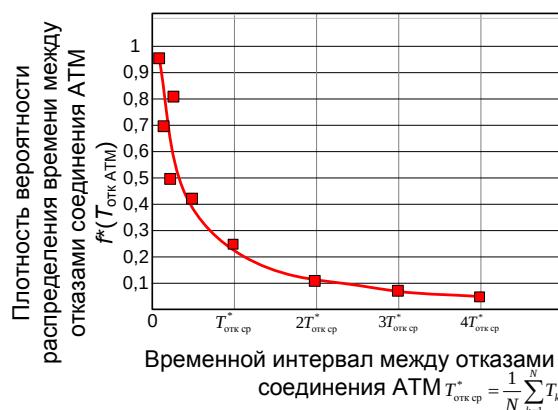


Рис. 7. Плотностью вероятности распределения времени между отказами соединения АТМ

Модель функционирования межузловое соединения ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП

Разработанная модель формализует процесс функционирования межузловое соединения ТНКСС и необходима для установления зависимости между временными параметрами сигнализации и отказа КС, как эффекта от воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС [23-25]. Диагностика отказов КС в протоколе PNNI осуществляется путем обмена соседними АТМ-маршрутизаторами служебными пакетами Hello с периодичностью, определяемой для каждого КС значением времени диагностики отказа в ИНС $T_{\text{диагн}}$. В рамках разработанной модели процесс функционирования межузловое соединения ТНКСС формализован в виде марковского процесса перехода между различными состояниями (рис. 8):

S_0 – «работоспособное состояние» соединения ТНКСС, когда служебные пакеты Hello вовремя принимаются АТМ-маршрутизаторами;

S_1 – «состояние отказа», когда соединение ТНКСС отказ не диагностировало и продолжает использовать КС как работоспособный, то есть состояние, в котором КС подавлен средствами РЭП, однако установить факт этого подавления возможно лишь в случае неприбытия в расчетное время служебного пакета Hello;

S_2 – «состояние ожидания», когда соединение ТНКСС диагностировало отказ КС, но ожидает восстановления связи в нем. Это состояние, характеризующееся неприбытием в расчетное время служебного пакета Hello, однако ввиду возможности его случайной утери (сбоя в КС) осуществляется подтверждение факта подавления КС на протяжении времени ожидания восстановления связи в ИНС $T_{\text{ож}}$, в течение которого служебные пакеты Hello не поступают;

S_3 – «состояние реконфигурации», когда соединение ТНКСС диагностировало, что восстановление связи в КС не произошло, и запущен процесс реконфигурации путей в ИНС в интересах восстановления работоспособности.

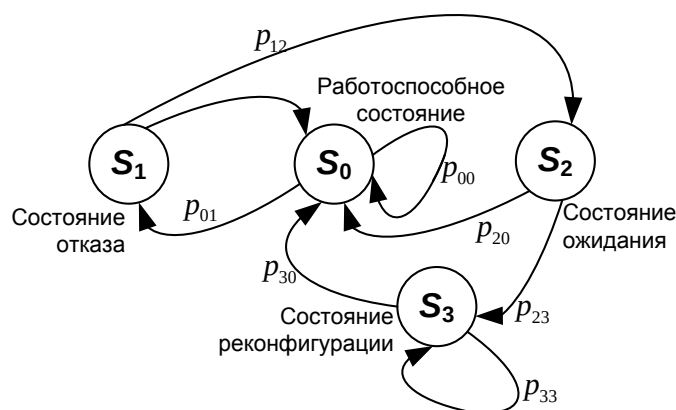


Рис. 8 Марковская модель функционирования межузловое соединения ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП

Вероятность p_{00} того, что интервал диагностики $T_{\text{диагн}}$ меньше времени среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, то есть КС за время диагностики не отказал и продолжает работать:

$$p_{00} = P(T_{\text{диагн}} < T_{\text{отк КС}}) = e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}}. \quad (10)$$

Вероятность p_{01} того, что интервал диагностики $T_{\text{диагн}}$ больше времени среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, то есть канал связи за время диагностики $T_{\text{диагн}}$ отказал и во время проведения диагностики объект установил этот отказ - система перешла в «состояние отказа»:

$$p_{01} = P(T_{\text{диагн}} > T_{\text{отк КС}}) = 1 - e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}}. \quad (11)$$

Вероятность p_{10} того, что за интервал диагностики $T_{\text{диагн}}$ канал успел и отказать, и восстановиться, в результате система вновь перешла в «работоспособное состояние»:

$$p_{10} = P(T_{\text{диагн}} > T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) = 1 - e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}. \quad (12)$$

Вероятность p_{12} того, что за интервал диагностики $T_{\text{диагн}}$ канал успел отказать, но не успел восстановиться и система перешла в «состояние ожидания» восстановления связи:

$$p_{12} = P(T_{\text{диагн}} < T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) = e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}. \quad (13)$$

Вероятность p_{20} того, что за время интервала диагностики $T_{\text{диагн}}$ и время ожидания $T_{\text{ож}}$ канал успел и отказать, и успел восстановиться, в результате система вернулась в «работоспособное состояние»:

$$p_{20} = P(T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} > T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) = 1 - e^{-\frac{T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}. \quad (14)$$

Вероятность p_{23} того, что за время интервала диагностики $T_{\text{диагн}}$ и время ожидания $T_{\text{ож}}$ канал успел отказать, но не успел восстановиться, и система перешла в «состояние реконфигурации»:

$$p_{23} = P(T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} < T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) = e^{-\frac{T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}. \quad (15)$$

Время реконфигурации принято распределенным по экспоненциальному закону с математическим ожиданием $T_{\text{рек}}$. В этом случае вероятность p_{33} того, что за время $T_{\text{рек}}$ объект успел изменить свои параметры и система перешла в «работоспособное состояние»:

$$p_{30} = P(t > T_{\text{рек}}) = e^{-1}, \quad (16)$$

а вероятность того, что за тоже время $T_{\text{рек}}$ продолжается реконфигурация:

$$p_{33} = P(t < T_{\text{рек}}) = 1 - e^{-1}. \quad (17)$$

Формализация функционирования соединения ТНКСС в виде марковского процесса с данными переходными вероятностями p_{ij} позволяет составить уравнения для состояний системы, при допущении о стационарности процесса ее функционирования:

$$\begin{cases} P(S_1)p_{10} + P(S_2)p_{20} + P(S_3)p_{30} - P(S_0)p_{01} - P(S_0)p_{00} + P(S_0)p_{00} = 0 \\ P(S_0)p_{01} - P(S_1)p_{12} - P(S_1)p_{10} = 0 \\ P(S_1)p_{12} - P(S_2)p_{20} - P(S_2)p_{23} = 0 \\ P(S_2)p_{23} - P(S_3)p_{30} - P(S_3)p_{33} + P(S_3)p_{33} = 0 \\ P(S_0) + P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) = 1 \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений позволит получить вероятности нахождения системы в соответствующих состояниях, в зависимости от переходных вероятностей:

$$\begin{cases} P(S_0) = \frac{P_{30}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}} \\ P(S_1) = \frac{P_{01}P_{30}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}} \\ P(S_2) = \frac{P_{01}P_{12}P_{30}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}} \\ P(S_3) = \frac{P_{01}P_{12}P_{23}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}} \\ P(S_0) + P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) = 1 \end{cases} \quad (18)$$

Схема расчета вероятностей нахождения межузлового соединения ТНКСС в различных состояниях приведена на рис. 9.

Вероятность нахождения соединения ТНКСС в работоспособном состоянии $P(S_0)$ по своему физическому смыслу соответствует коэффициенту готовности ИНС K_{Γ} . Таким образом, зависимость коэффициента готовности ИНС от временных интервалов сигнализации и отказов КС вследствие воздействия средств РЭП определяется выражением:

$$K_{\Gamma} = P(S_0) = \frac{e^{-1}}{\left(1 - e^{-\frac{1}{T_{\text{отк КС}}} T_{\text{диагн}}}\right) \left(1 + e^{-\frac{1}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} T_{\text{диагн}}} + (1 - e^{-\frac{1}{T_{\text{отк КС}}} T_{\text{диагн}}})^{-1} + e^{-\frac{1 - 2T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}\right)} \quad (19)$$

Результаты исследования зависимости $P(S_i)$ от значений $T_{\text{диагн}}$ и $T_{\text{ож}}$, нормированных к среднему времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, при различных значениях $T_{\text{вост КС}}$ с учетом следующих ограничений: $T_{\text{отк}}=1$; $T_{\text{диагн}}=1T_{\text{отк КС}} \dots 3T_{\text{отк КС}}$; $T_{\text{ож}}=1T_{\text{диагн}} \dots 5T_{\text{диагн}}$; $T_{\text{рек}}=10T_{\text{отк КС}}$; $T_{\text{вост КС}}=0,01, 0,25, 1$ приведены на рис. 10 а-в.

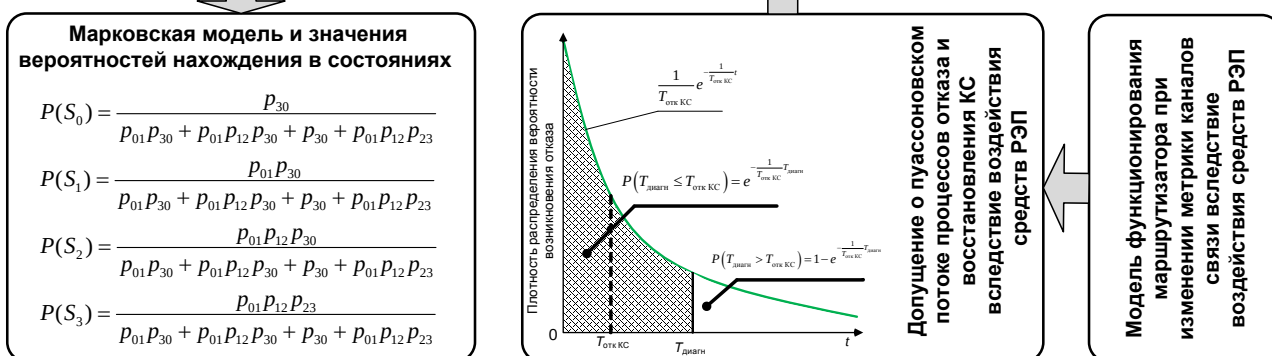
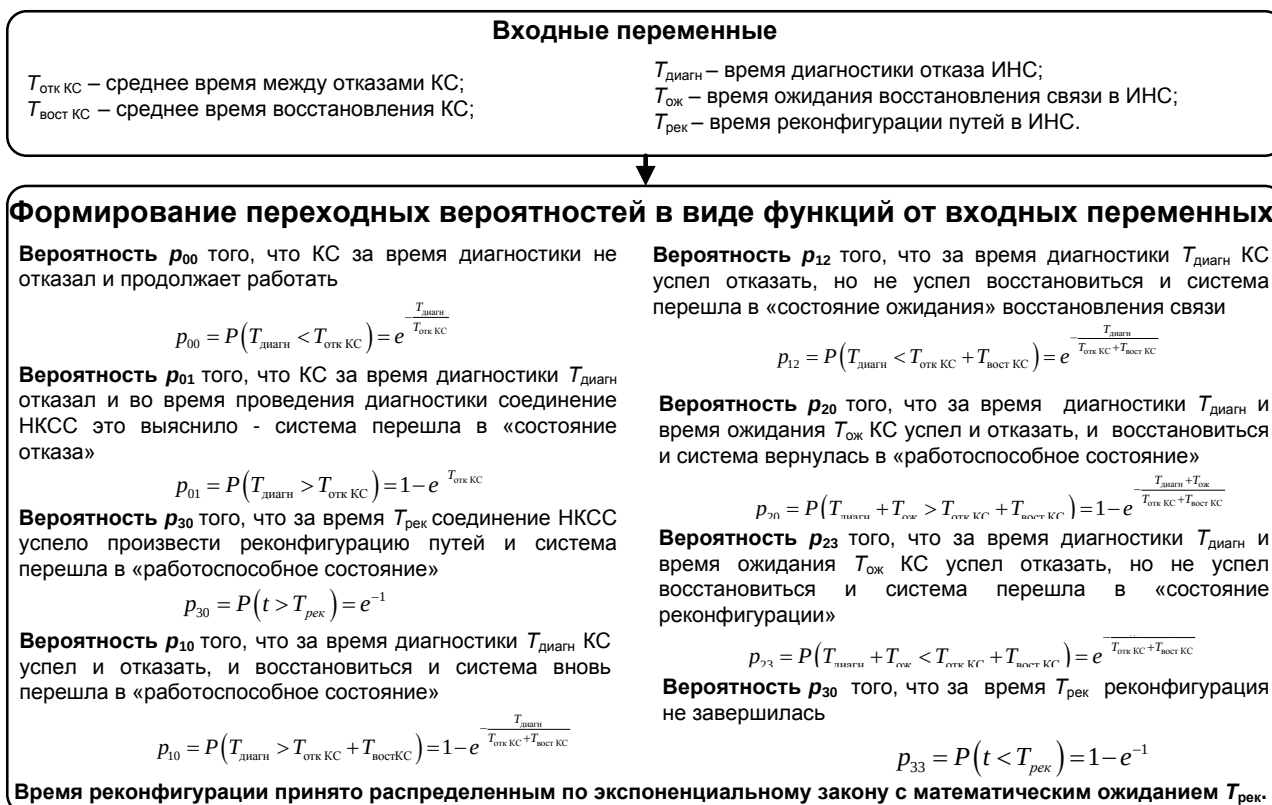


Рис. 9. Схема расчета вероятностей нахождения объекта связи в различных состояниях

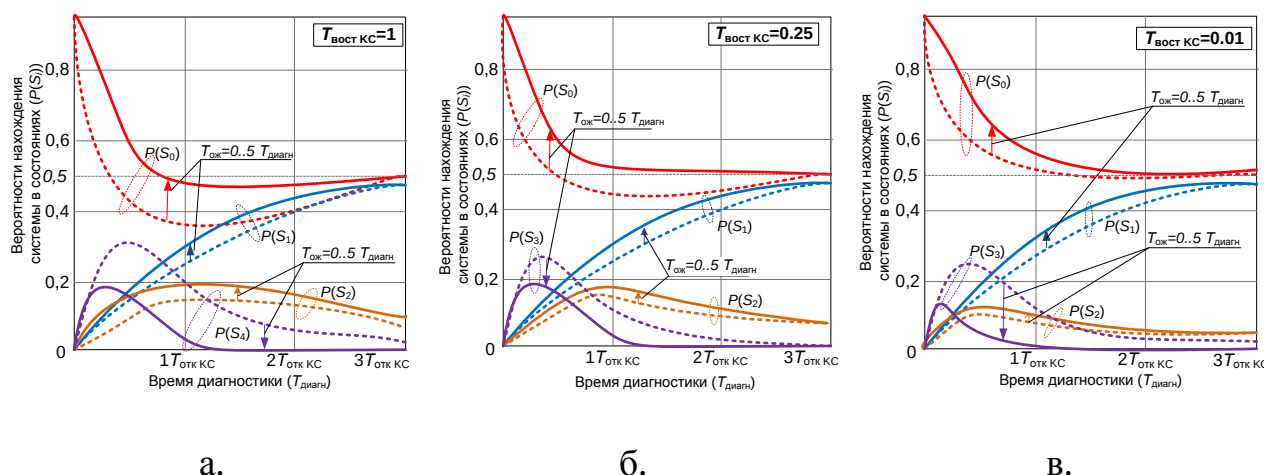


Рис. 10. Зависимости конечных вероятностей состояний системы $P(S_i)$ от $T_{\text{диагн}}$, $T_{\text{ож}}$, $T_{\text{вост КС}}$

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 10. а-в, позволяет сделать следующие выводы.

- 1) Отношение $T_{ож}/T_{диагн}$ влияет на быстроту схождения $P(S_i)$ к предельным значениям. При $T_{ож} = 0T_{диагн}$, значения $P(S_0)$, $P(S_1)$, $P(S_2)$ достигают своего минимального значения, а $P(S_3)$ – максимального. Увеличение этого отношения выше значения $T_{ож}/T_{диагн}=5$ не влияет на значения вероятностей нахождения системы в различных состояниях $P(S_i)$.
- 2) При увеличении значений $T_{диагн}$ вероятность работоспособного состояния $P(S_0)$ снижается и стремится к своему предельному значению $P(S_0) \rightarrow 0,5$. При этом значения K_r определяют наличие и значение минимума функции $P(S_0)$.
- 3) Уже при значениях $T_{диагн} = 0,25T_{отк\ КС}$ ($T_{ож} = 5T_{диагн}$) значение вероятности нахождения в работоспособном состоянии $P(S_0)$ принимает критическое значение $P(S_0) = 0,9$, а при меньшем значении $T_{ож} < 5T_{диагн}$ происходит снижение значений вероятности до $P(S_0) < 0,9$, что является неприемлемым значением для коэффициента готовности ИНС K_r .
- 4) При уменьшении $T_{диагн}/T_{отк\ КС}$ снижается влияние значение среднего времени восстановления КС $T_{вост\ КС}$ на вероятности $P(S_i)$, а при $T_{диагн} \leq 0,01T_{отк\ КС}$ вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии $P(S_0)$ практически от $T_{вост\ КС}$ не зависит.

Алгоритм маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности ТНКСС

Целью разработки алгоритма является сокращение времени реконфигурации $T_{рек}$. В работе [26] показано, что для резервируемых КС время реконфигурации $T_{рек}$ определяется в соответствии с выражением (20):

$$T_{рек} = T_{увед} + T_{ПНП} + T_{перекл}, \quad (20)$$

где $T_{увед}$ – время уведомления об отказе КС узла, ответственного за реконфигурацию путей, $T_{ПНП}$ – время, необходимое для нового поиска кратчайших путей, $T_{перекл}$ – время переключения на резервные пути.

Время уведомления об отказе КС узла, ответственного за реконфигурацию путей, $T_{увед}$ зависит от времени передачи между отдельными узлами сообщения об отказе T_p и от количества участков сети d_{ij} , между узлом, обнаружившим отказ КС (узел i), и узлом, ответственным за переключение путей (узел j) [26].

$$T_{увед\ i} = T_p d_{ij}, \quad (21)$$

Время, необходимое для нового поиска кратчайших путей, $T_{ПНП}$ зависит от используемого алгоритма поиска кратчайших путей, а также размера СС.

Время переключения на резервные пути $T_{перекл}$ зависит от быстродействия маршрутизатора (коммутатора).

Таким образом, сокращение времени реконфигурации $T_{рек}$ возможно осуществить путем снижения времени уведомления об отказе КС узла,

ответственного за реконфигурацию путей, $T_{увед}$ и времени, необходимого для нового поиска кратчайших путей, $T_{ппп}$. Снижение времени уведомления об отказе КС узла, ответственного за реконфигурацию путей, $T_{увед}$ достигается путем организации возможности переключения на резервные маршруты в случае отказа КС узлом, ближайшим к этому отказу. В этом случае, согласно выражению (21), количество участков сети d_{ij} , между узлом, обнаружившим отказ КС, и узлом, ответственным за переключение путей, а, следовательно, и сам временной показатель $T_{увед}$ будут равно нулю. Снижение времени, необходимого для нового поиска кратчайших путей, $T_{ппп}$, достигается посредством заблаговременного поиска как кратчайших, так и резервных путей в СС и занесение их в таблицы маршрутизации.

В ходе разработки алгоритма проведена модификации алгоритма Дейкстры, и в него дополнительно внесены изменения, направленные на расширение его функциональности, связанной с формированием резервных путей в соответствии с вышеуказанными положениями [27-28]. В основу предлагаемой модификации алгоритма Дейкстры являются следующие положения.

- 1) При достижении очередной вершины, запоминаются исходящие вершины входящих в эту вершину ребер, как потенциальные элементы будущего резервного пути к этой вершине (рис. 11).
- 2) При очередном шаге функционирования, алгоритма, достигнутая очередная вершина проверяется как потенциальный элемент резервного пути для всех уже достигнутых вершин. Если она является потенциальным элементом резервного пути, формируется резервный путь к ранее достигнутой вершине, через только что достигнутую (рис. 12).

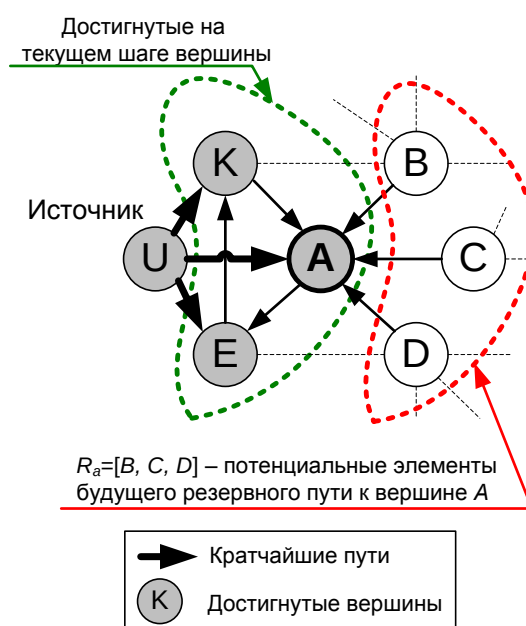
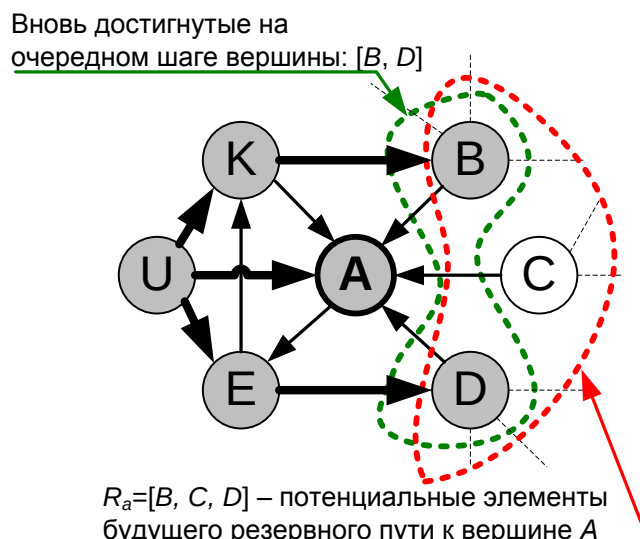


Рис. 11. Запись потенциальных элементов будущего резервного пути к вершине



Сравнение $[B, C, D]$ и $[B, D]$ приводит к выводу, что резервные пути к A лежат через B и D.

Рис. 12. Формирование резервного пути к вершине

- 3) Если к ранее достигнутой вершине уже были сформированы резервные пути и она участвует в создании нового резервного пути к очередной вершине, то к очередной вершине формируется множество резервных путей с включением в них всех возможных вариантов резервных путей сформированных ранее. Причем, если в резервный путь входит сама очередная вершина то такой путь, во избежание циклов, в резервные не включается (рис. 13).
- 4) Все резервные пути к вершинам сети упорядочиваются в соответствии с минимизацией весов и вносятся в таблицу маршрутизации наряду с кратчайшим путем. При отказе элементов кратчайшего пути для передачи выбирается резервный путь с минимальным суммарным весом, не содержащий отказавшие элементы (рис. 14).

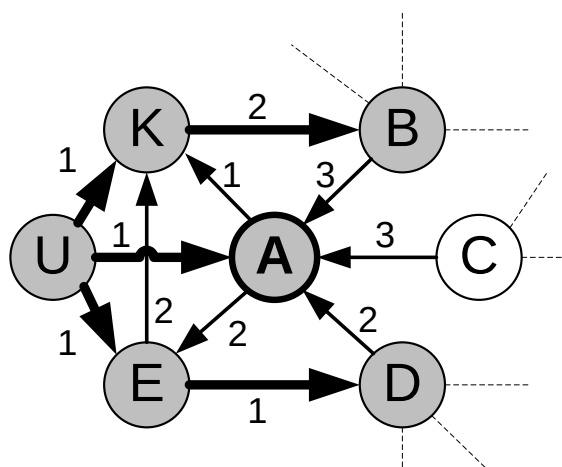


Рис. 13. Пример построения резервных путей к вершине

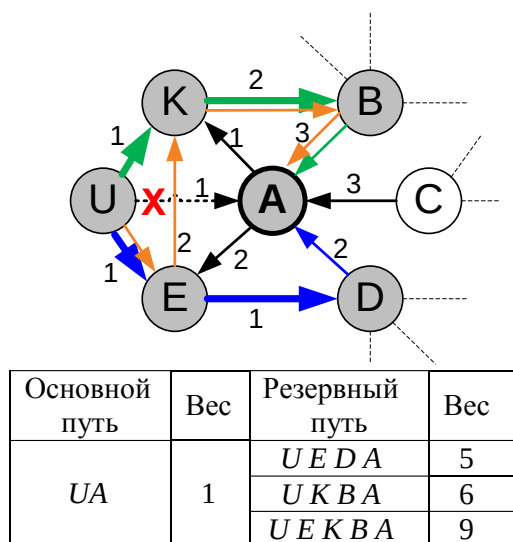


Рис. 14. Пример построения резервных путей к вершине

Схема алгоритма маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности ТНКСС приведена на рис. 15.

Входными параметрами алгоритма являются: ориентированный граф сети $G(U, V)$; количество вершин в графе n ; веса ребер, соединяющих произвольные i -ую и j -ую вершины $V(U_i, U_j)$.

Для обеспечения работы алгоритма помимо имеющихся множеств (P – множество помеченных вершин, L – множество смежных помеченных вершин, множество расстояний до помеченных и вершин от начальной вершины) вводятся следующие дополнительные множества.

- 1) R – множество вершин потенциальных резервных путей. В это множество вносятся достигнутые вершины, смежные рассматриваемой. В дальнейшем, элементы множества используются при нахождении резервных путей.
- 2) S – множество весов ребер потенциальных резервных путей. В это множество вносятся веса ребер, исходящих из вершин, вносимых в множество R и входящих в рассматриваемую вершину.
- 3) 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 множества R и L .
- 4) S – множество весов резервных путей к вершине. Это множество содержит веса путей из множества Z и используется для ранжировки резервных путей при выводе результатов работы алгоритма.

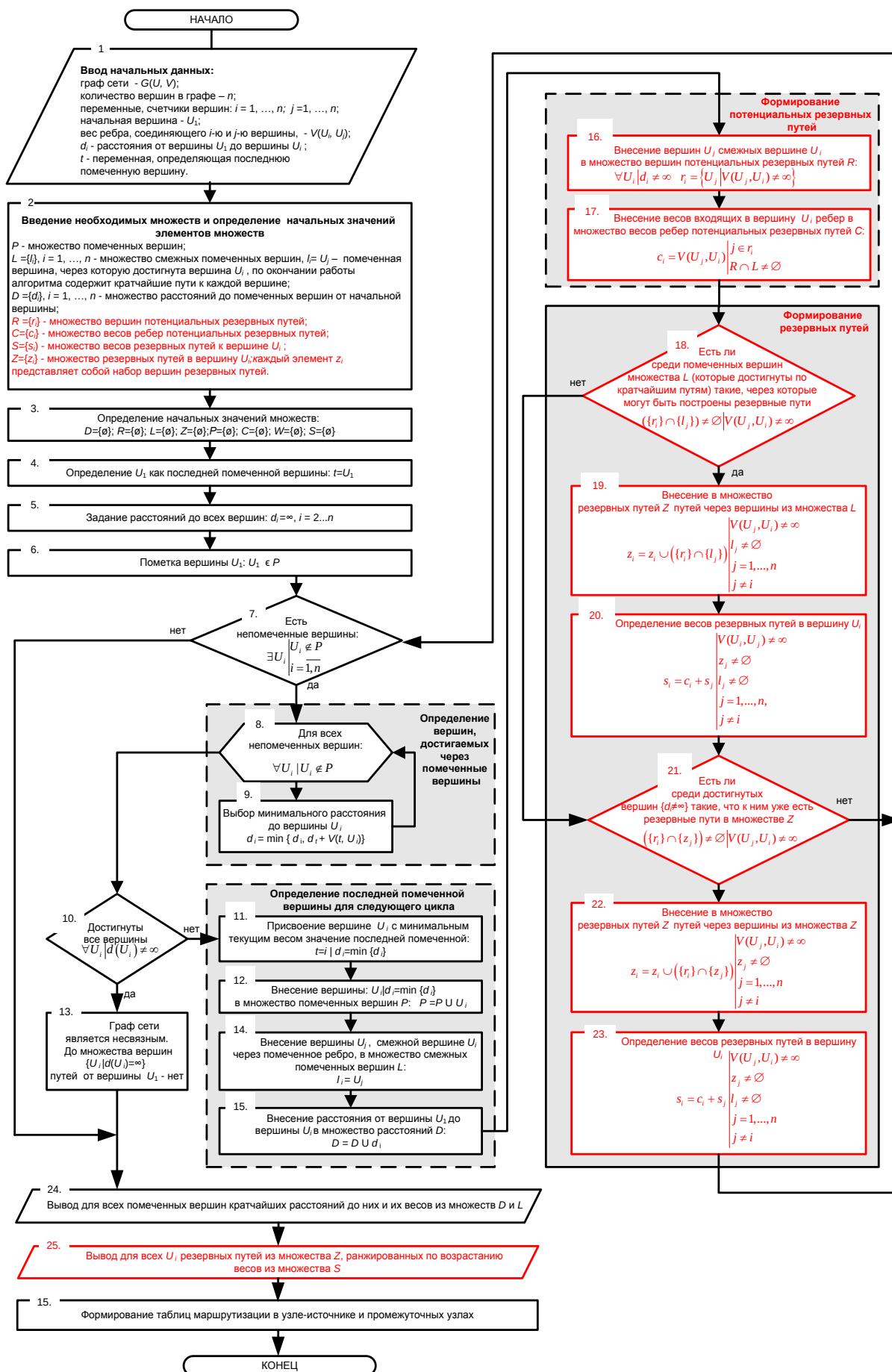


Рис. 15. Алгоритм маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности ТНКСС

К новым элементам алгоритма относятся блоки 16-23, 25. В блоках 16-17 реализуется формирование элементов множества вершин R к текущей рассматриваемой вершине за счет использования положения № 1 по модификации алгоритма. Далее, в блоках 18-23, путем пересечения элементов множества R и L , а также Z , осуществляется формирование элементов множества Z с учетом положения № 2 по модификации алгоритма. В блоке 25 осуществляется ранжировка резервных путей по сумме весов, входящих в их состав ребер.

Алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП

С учетом выражения (9) для коэффициента готовности ИНС K_T и уменьшая время реконфигурации путей в ИНС $T_{рек}$ благодаря использованию алгоритма маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности ТНКСС, возможно определить значения временных параметров сигнализации, обеспечивающих заданный уровень вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ согласно выражению (8). Для этого был разработан алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП, представленный на рис. 16.

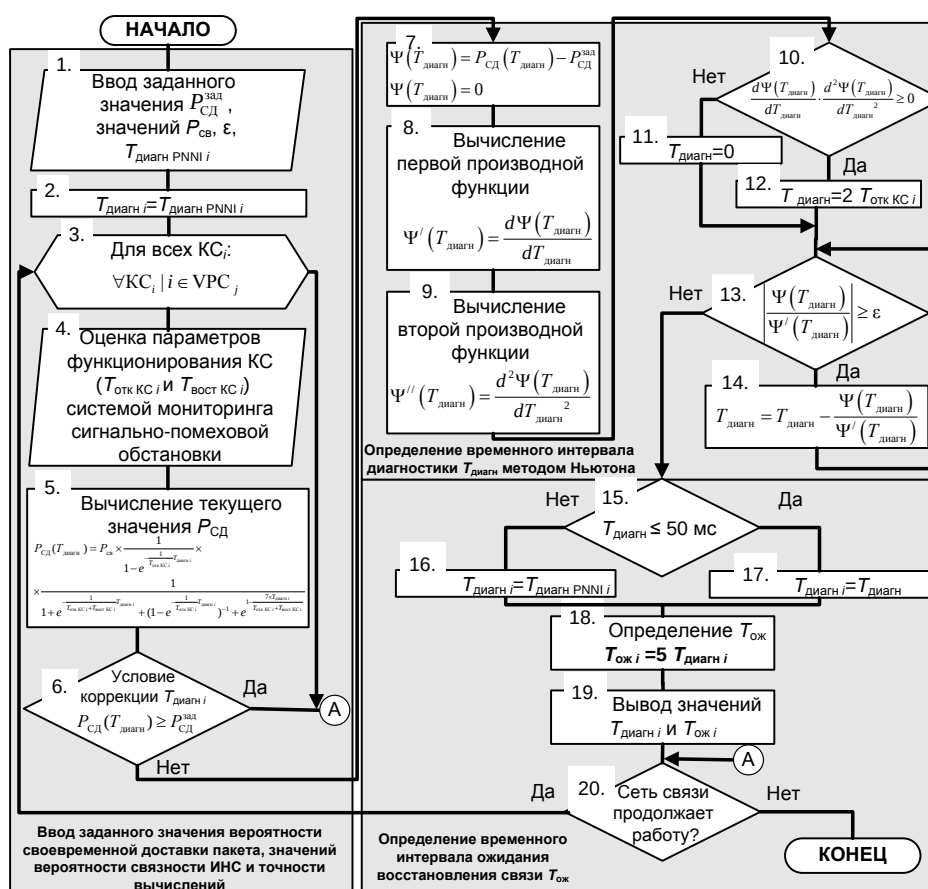


Рис. 16. Алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП

Входными параметрами алгоритма являются: заданный уровень вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}^{\text{зад}}$; среднее время между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$; значение вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$; среднее время восстановления КС $T_{\text{вост КС}}$; заданная точность вычислений ε .

Значение вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$ заблаговременно определяется исходя из структуры ТНКСС и вероятностей работоспособного состояния отдельных ее элементов (КС и узлов связи). Определение значения среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$ осуществляется системой мониторинга сигнально-помеховой обстановки. Среднее время восстановления КС $T_{\text{вост КС}}$ определяется временными затратами, связанными со сменой сигнально-кодовых созвездий с целью восстановления работоспособности КС при превышении ОСШП значений, заданных в технологии DVB-S2. В алгоритме используются обоснованные в рамках модели функционирования межузлового соединения ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП отношение $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}}=5$ и значение среднего времени восстановления КС $T_{\text{вост КС}}=0$. Ключевыми блоками алгоритма являются блоки 7-14, в которых осуществляется численный расчет времени диагностики $T_{\text{диагн}}$ методом Ньютона. Более подробно алгоритм описан в работе [29].

Оценка повышения устойчивости ТНКСС СВС ВС РФ при использовании разработанных алгоритмов

Проведенное в работе моделирование в среде MathCad показало, что использование алгоритма маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности ТНКСС СВС ВС РФ позволяет повысить отношение $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ при котором обеспечивается заданный уровень вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}^{\text{зад}}$, на 60-65%, в зависимости от значения вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$ (рис. 17.), вследствие этого прирост вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}$ может достигать 7%, в зависимости от имеющегося отношения $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}}$ и значения $P_{\text{св}}$ (рис. 18.). Изменение целевых показателей работы (8) в зависимости от значения среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$ приведено на рис. 19. а-б. Уменьшение значения вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$ в случае, если не используются разработанные алгоритмы приводит к снижению вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}$, а в случае, если используются разработанные алгоритмы – к повышению минимального значения времени диагностики $T_{\text{диагн}}$, при котором обеспечивается заданное значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}^{\text{зад}}$. Использование разработанных алгоритмов позволяет обеспечить заданное значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}^{\text{зад}} = 0,9 | T_{\text{дост}}^{\text{зад}} = 3 \text{ с.}$ при значениях $T_{\text{отк КС}} > 1,2 \text{ с.}$ при этом эффективность их использования E_y (рис. 20.) при $T_{\text{отк КС}} = 1,2 \dots 600 \text{ с}$ достигает 80%, что позволяет говорить о достижении цели диссертационного исследования.

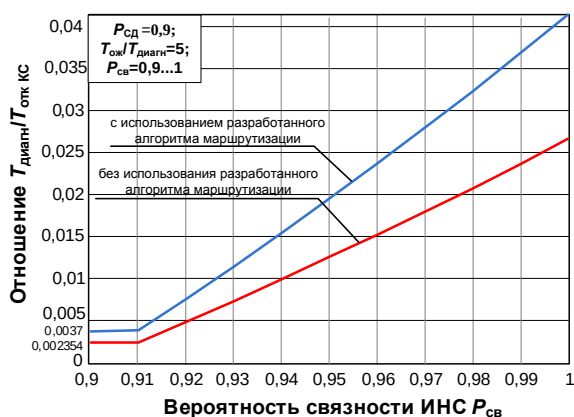


Рис. 17. Зависимость требуемого отношения $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ для обеспечения $P_{\text{зд}}$ при различных значениях $P_{\text{св}}$

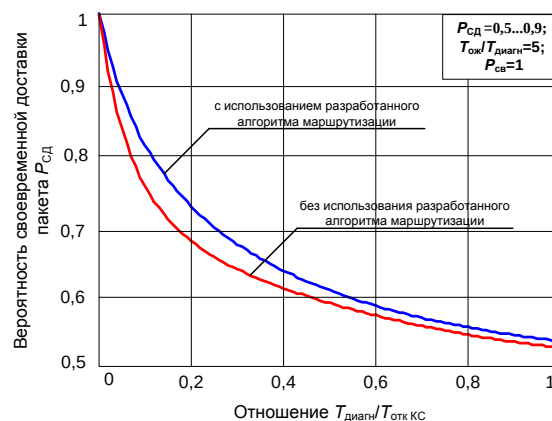
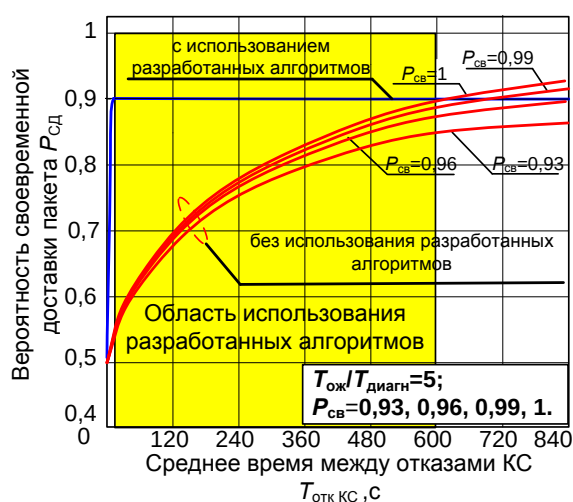
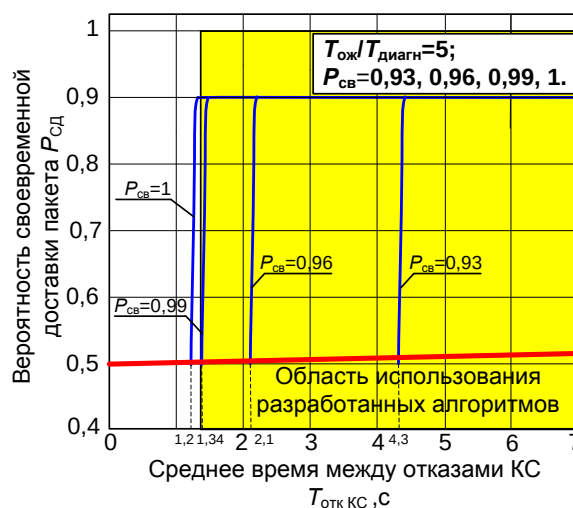


Рис. 18. Зависимость $P_{\text{зд}}$ от отношения $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$



а.



б.

Рис. 19. Зависимость $P_{\text{зд}}$ от $T_{\text{отк КС}}$

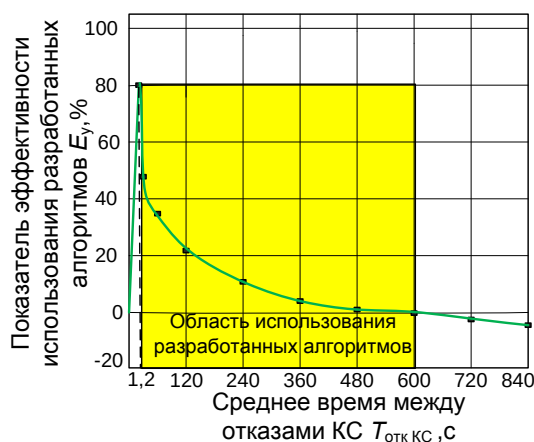


Рис. 20. Зависимость E_y от $T_{\text{отк КС}}$

Разработаны предложения по технической реализации разработанных алгоритмов для математического обеспечения коммутатора пакетов путем дополнения его блоком адаптивного изменения временных параметров сигнализации и дополнительным объемом памяти для хранения информации о резервных маршрутах. Проведен военно-экономический анализ целесообразности внедрения разработанного математического обеспечения.

Выводы

В работе описаны элементы научно-методического аппарата маршрутизации информационных потоков, применение которых позволяет повысить устойчивости ТНКСС СВС ВС РФ в условиях воздействия средств РЭП.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- 1) Впервые полученные модель функционирования АТМ-маршрутизатора и модель межузлового соединения ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП, отличающиеся от известных возможностью оценки параметров КС сетевого уровня ЭМВОС как результата преднамеренных воздействий средств РЭП, с учетом схем адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования, а также оригинальным переходом от соотношения временных интервалов сигнализации к вероятностным параметрам марковской модели, позволяющим получить аналитические выражения для зависимости вероятности нахождения межузлового соединения ТНКСС в работоспособном состоянии от значений временных интервалов сигнализации.
- 2) Алгоритм маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности ТНКСС, отличающийся от используемого в протоколе PNNI алгоритма Дейкстры новыми функциональными элементами, обеспечивающими возможность поиска в структуре ТНКСС резервных путей одновременно с ведением поиска кратчайших путей, что позволяет снизить время реконфигурации путей в ТНКСС, вызванное подавлением КС ТНКСС средствами РЭП.
- 3) Алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП, основанный на использовании оригинальной модели функционирования межузлового соединения ТНКСС в условиях воздействия средств РЭП для обоснования временных параметров сигнализации при заданных условиях воздействия средств РЭП. Применение данного алгоритма обеспечивает более адекватную диагностику факта подавления КС на сетевом уровне ЭМВОС, что позволяет повысить устойчивость ТНКСС путем динамического изменения временных интервалов сигнализации исходя из оценки интенсивности воздействия средств РЭП.

Литература

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 (48). С. 93-101.
2. Надежность и живучесть систем связи / Под ред. Дудника Б. Я. М.: Радио и связь, 1984. 350 с.
3. Нетес В.А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN // Вестник связи. 2007. № 9. С. 1-8.
4. Киселев Л. К., Маркелов А. П., Воробьев Б. В. Концептуальные основы обеспечения устойчивости сетей связи // Электросвязь. 1994. № 2.
5. Юрасова Л. В., Кондратов С. Ф. Проблемы разработки нормативных правовых актов по вопросам применения средств связи // Электросвязь. 2007. № 3.
6. ГОСТ 5311 – 2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. М.: Стандартинформ, 2008. 15 с.
7. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. №4. С. 69-79.
8. Боговик А. В., Игнатов В. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. СПб.: ВАС, 2006. 183 с.
9. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: Поликом, 2010. 389 с.
10. Ададулов С. Е., Чатоян С. К., Зелинский А. Е. Показатели устойчивости информационного обмена в защищенных телекоммуникационных системах // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 1999. № 2. С. 100-107.
11. Ушаков И. А. Курс теории надежности систем: учебное пособие для ВУЗов. М.: Дрофа, 2008. 239 с.
12. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на функционирование расширенного протокола маршрутизации внутреннего шлюза (EIGRP) // Информационные технологии моделирования и управления. 2010. № 2 (61). С. 223-229.
13. Фокин В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие. М.: Эко-Трендз, 2008. 271 с.
14. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation system for Broadcasting Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications.
15. ETSI EN 300 421. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services.

16. ETSI EN 301 210. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite.
17. ETSI TR 102 376 v. 1.1.1 (2005-02). Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).
18. ETSI EN 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.
19. Стандарт DVB-S2. Система цифрового ТВ вещания. // Контур–М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: www.konturm.ru/tech.php?id=dvbs2
20. Макаренко С. И. Модели воздействия средств радиоэлектронной борьбы на систему связи на основе методов популяционной динамики // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 96-99.
21. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. URL: jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf (дата обращения 11.08.2015).
22. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Новиков Е. А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (дата обращения 11.08.2015).
23. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Рюмшин К. Ю. Модель функционирования объекта сети связи в условиях ограниченной надежности каналов связи // Информационные системы и технологии. 2014. № 6 (86). С. 139-147.
24. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Модель функционирования коммутатора в сети с использованием протокола покрывающего дерева STP и исследование устойчивости сети в условиях ограниченной надежности каналов связи // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 2. С. 61-68.
25. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Модель функционирования маршрутизатора в сети в условиях ограниченной надежности каналов связи // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Том 12. № 2. С 44-49.
26. Егунов М. М., Шувалов В. П. Анализ структурной надежности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54-60.
27. Цветков К. Ю., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры с целью повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2. С. 71-78.

28. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Предложения по модификации алгоритма Дейкстры для повышения устойчивости протоколов маршрутизации с использованием топологической избыточности сетей единой спутниковой системы связи 3-го поколения // Сборник алгоритмов и прикладных задач. СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского. 2013. № 30. С. 135-143.

29. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Адаптация параметров сигнализации в протоколе маршрутизации с установлением соединений при воздействии на сеть дестабилизирующих факторов // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 1. С. 98-126. URL: <http://journals.intelgr.com/sccs/arhov/2015-01/07-Makarenko.pdf> (дата обращения 11.08.2015).

References

1. Antonovich P. I., Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Ushanev K. V. Perspektivnye sposoby destruktivnogo vozdviistviia na sistemy voennogo upravleniia v edinom informatsionnom prostranstve [Perspective Ways of Influence on Military Centric Control System]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 93-101. (In Russian).

2. Dudnik B. Ia. *Nadezhnost' i zhivuchest' sistem sviazi* [The Reliability and the Liveness of Communication Systems]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1984, 350 p. (in Russian).

3. Netes V. A. Nadezhnost' setei sviazi v period perekhoda k NGN [The Reliability of Communication Networks during the Conversion for New Generation Nets (NGN)]. *Vestnik sviazi*, 2007, no. 9, pp. 1-8 (in Russian).

4. Kiselev L. K., Markelov A. P., Vorob'ev B. V. Kontseptual'nye osnovy obespecheniia ustoichivosti setei sviazi [Conceptual Frameworks of Communication Network` Sustainability]. *Telecommunication and Radio Engineering*, 1994, no. 2 (in Russian).

5. Iurasova L. V., Kondratov S. F. Problemy razrabotki normativnykh pravovykh aktov po voprosam primeneniia sredstv sviazi [The Problem Aspects of the Normative Documents of Communication Facilities` Application Developing]. *Telecommunication and Radio Engineering*, 2007, no. 3 (in Russian).

6. *State Standard 5311–2008. Stability of functioning of the public communications network*. Moscow, StandartInform, 15 p. (in Russia).

7. Mikhailov R. L., Makarenko S. I. Ocenka ustojchivosti seti svyazi v uslovijah vozdeystviia na nee destabilizirujushhih faktorov [Estimating Communication Network Stability Under the Conditions of Affecting Destabilization Factors on It]. *Radioengineering and Telecommunication Systems*, 2013, no. 4, pp. 69-79 (in Russian).

8. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Effektivnost' sistem voennoi sviazi i metody ee otsenki* [The Effectiveness of Military Communication System and Methods of its Rating]. Saint Petersburg, Military Academy of Communications, 2006. 183 p. (in Russian).

9. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevykh parametrov setej svyazi sledujushhego pokoleniya* [The Models and the Methods of Measuring of Quality Indicators of Nodal Equipment Functioning and Network Structural Parameters of Next Generation Networks]. Krosnoyarsk, Polykom Publ., 2010. 389 p. (in Russian).
10. Adadurov S. E., Chatoian S. K., Zelinskii A. E. Pokazateli ustoichivosti informatsionnogo obmena v zashchishchennykh telekommunikatsionnykh sistemakh [The Indexes of Communication` Sustainability of Guarded Telecommunication Systems]. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy*. 1999, no. 2, pp. 100-107 (in Russian).
11. Ushakov I. A. *Kurs teorii nadezhnosti system* [The Theory of Reliability]. Moscow, Drofa Publ., 2008. 239 p. (In Russian).
12. Makarenko S. I. Analiz vozdetsviia prednamerennykh pomekh na funktsionirovanie rasshirennogo protokola marshrutizatsii vnutrennego shliuza (EIGRP) [The Analysis of Purposeful Noise on Functioning of Enhanced Interior Gateway Protocol]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2010, vol. 61, no. 2, pp. 223-229 (in Russia).
13. Fokin V. G. *Opticheskie sistemy peredachi i transportnye seti* [Optical Systems of Communication and Transport Networks], Moscow, Jeko-Trendz Publ., 2008, 271 p. (in Russian).
14. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation system for Broadcasting Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications.
15. ETSI EN 300 421. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services.
16. ETSI EN 301 210. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite.
17. ETSI TR 102 376 v. 1.1.1 (2005-02). Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).
18. ETSI EN 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.
19. Standart DVB-S2. The system of digital television. *Kontur-M*, Available at: www.konturm.ru/tech.php?id=dvbs2 (accessed 11 August 2015) (in Russian).
20. Makarenko S. I. Modeli vozdetsviia sredstv radioelektronnoi bor'by na sistemu svyazi na osnove metodov populiatsionnoi dinamiki [The Models of Radio Electronic Warfare` Effect on Communication Systems Based on Methods of Population` Dynamics]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no. 1, pp. 96-99 (in Russian).
21. Makarenko S. I. *Otsenka kachestva obsluzhivaniia paketnoi radioseti v nestatsionarnom rezhime v usloviakh vozdetsviia vneshnikh destabiliziruiushchikh faktorov* [The Estimation of Quality of Service of Packet Network in External

Destabilizing Factors Environment]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2012, no. 6. Available at: jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf (accessed 11 August 2015) (in Russian)

22. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. Issledovanie kanal'nykh i setevykh parametrov kanala svyazi v usloviakh dinamicheski izmeniaiushcheisia signal'no–pomekhovoi obstanovki [The Research of Data Link Layer and Network Layer Parameters of Communication Channel in the Conditions Dynamic Vary of the Signal and Noise Situation]. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (accessed 11 August 2015) (in Russian).

23. Makarenko S. I., Ryimshin K. Yu., Mixajlov R. L. Model' funktsionirovaniia ob'ekta seti svyazi v usloviakh ogranicennoi nadezhnosti kanalov svyazi [Model of Functioning of Telecommunication Object in the Limited Reliability of Communication Channel Conditions]. *Information Systems and Technologies*, 2014, no. 6, pp. 139-147 (in Russia).

24. Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Model' funktsionirovaniia kommutatora v seti s ispol'zovaniem protokola pokryvaiushchego dereva STP i issledovanie ustoichivosti seti v usloviakh ogranicennoi nadezhnosti kanalov svyazi [The Model of the Switch, Functioning in the Network Which Applies the Spanning Tree Protocol and the Net Stability in the Conditions of the Communication Channels Limited]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2013, no. 2, pp. 61-68 (in Russian).

25. Makarenko S. I., Mikhaylov R. L. Model' funktsionirovaniia marshrutizatora v seti v usloviakh ogranicennoi nadezhnosti kanalov svyazi [The Model of Functioning of the Router in the Case of Limited Reliability of Communication Canals]. *Infocommunikacionie tehnologii*, no. 2, 2014, pp. 44-49 (in Russian).

26. Egunov M. M., Shuvalov V. P. Analiz strukturnoi nadezhnosti transportnoi seti [The Analysis of Structural Reliability of Traffic Nets]. *Vestnik SibGUTY*, 2012, no. 1, pp. 54–60 (in Russian).

27. 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, vol. 69, no. 2, pp. 71-78 (in Russian).

28. Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Predlozheniia po modifikatsii algoritma Deikstry dlia povysheniia ustoichivosti protokolov marshrutizatsii s ispol'zovaniem topologicheskoi izbytochnosti setei edinoi sputnikovoi sistemy svyazi 3-go pokoleniia [The Proposition of Dijkstra's Algorithm Medication for Enhancement of Routing Protocols` Sustainability with the Application of United Satellite Communication Networks` Topological Redundancy]. *Sbornik algoritmov i prikladnykh zadach*, Saint Petersburg, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 2013, no. 30. pp. 135-143 (in Russian).

29. Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Signaling with Adaptation Parameters in Routing Protocol with a Connection on Influence of Destabilizing Factors. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 1, pp. 98-126. Available at: <http://journals.intelgr.com/scs/arhov/2015-01/07-Makarenko.pdf> (accessed 11 August 2015) (in Russian).

Статья поступила 8 августа 2015 г.

Информация об авторе

Михайлов Роман Леонидович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: устойчивость сетей связи, маршрутизация информационных потоков, комплексное воздействие на сети связи средств наблюдения и подавления. Тел.: +7 911 777 69 73. E-mail: mikhailov-rom2012@yandex.ru

Адрес: 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

Routing models and algorithms of transport terrestrial-cosmic military network

Mikhailov R. L.

Problem statement: Application of modern technologies of packet transmission in transport terrestrial-cosmic military network updates the issues of sustainability of their operation, which vital influence the timeliness of personnel and weapon` control system. It is shown, that known routing protocols are not able to support the requisite level of sustainability of communication in purposeful destabilizing factors `effect environment, and, therefore, the necessity of their enhancement is needed. **The aim** of this research is to increase the sustainability of communication networks by researching the routing models and algorithms of data flow in purposeful destabilizing factors `effect environment. **The method used:** The methods of probability theory, theory of reliability, theory of Markov random process and graph theory were used. **Novelty** of this issue is the introduction of the sustainability of communication` coefficient, which discounts correlation between the effect of destabilizing factors `effect environment in the fault of communication channel and the characteristic of net level of Open Systems Interconnection, also the criterion of signaling timers` decision for the enhancement of that coefficient was presented. **Result:** the model-based analysis displayed, that the application of developed algorithms allows to support the requisite level of sustainability of transport terrestrial-cosmic military network with the effectiveness amount to 80% regarding of extracted coefficient. **The practical significance** of the work encloses the evolution of developed models and algorithm up to program modification of PNNI routing protocol for mathematical support of packet switch.

Key words: satellite communication system, transport communication network, sustainability of communication, routing, ATM, PNNI.

Information about Author

Mikhailov Roman Leonidovich – Doctoral Candidate. The postgraduate student of the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: sustainability of communication, routing of data flow, unified influence of monitoring and rejection means on communication networks. Tel.: +7 911 777 69 73. E-mail: mikhailov-rom2012@yandex.ru

Address: Russia, 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.