

УДК 004.738

## Адаптация параметров сигнализации в протоколе маршрутизации с установлением соединений при воздействии на сеть дестабилизирующих факторов

Макаренко С. И., Михайлов Р. Л.

**Постановка задачи:** увеличение структурной сложности сетей связи актуализирует вопросы обеспечения их устойчивости к воздействиям дестабилизирующих факторов. Известные способы повышения устойчивости направлений связи, основываются на маршрутизации информационных потоков по основному и нескольким резервным путям, и не учитывают потери времени на процессы реконфигурации соединений. **Целью работы** является обеспечение заданного уровня устойчивости соединения по показателю коэффициента готовности соединения с учетом его структуры и за счет адаптации временных параметров диагностики состояния работоспособности соединения к надежностным показателям элементов соединения. Предлагается при обеспечении устойчивости учитывать не только структуру соединения, но и временные затраты на восстановление связи. В работе показано, что эти временные затраты определяются временными параметрами отказов элементов соединений и периодом диагностики работоспособности элементов. Адаптивное изменение периода диагностики работоспособности элементов соединения в соответствии с измеряемым средним временем отказа элементов позволит обеспечить заданный уровень устойчивости соединения. **Используемые методы:** решение задачи адаптации параметров сигнализации в протоколе маршрутизации с установлением соединений основано на использовании методов теории надежности и теории Марковских процессов. В качестве критерия достижения заданного уровня устойчивости соединения предложено использовать значение коэффициента готовности соединения с учетом его структуры и процессов его реконфигурации. **Новизна:** элементами новизны представленного решения являются учет воздействия деструктивных факторов через переходные вероятности оригинальной Марковской модели. Также к элементам новизны стоит отнести новый подход к оценке коэффициента готовности соединения основанный на дополнительной оценке процессов реконфигурации соединения. **Результат:** использование представленного решения по адаптации параметров сигнализации в протоколе маршрутизации с установлением соединений позволяет обеспечить заданный уровень устойчивости (по показателю коэффициент готовности соединения) при отказе его отдельных элементов из-за воздействия дестабилизирующих факторов. **Практическая значимость:** представленное решение предлагается реализовать в виде математического обеспечения протоколов маршрутизации с установлением соединения: Hello, PNNI, MPLS функционирующих в сетях подвергающихся воздействию дестабилизирующих факторов. Такая реализация позволит осуществлять адаптивное динамическое изменение параметров сигнализации в области периода диагностики состояния соединения (из конца в конец) в зависимости от уровня воздействия дестабилизирующих факторов на элементы сети.

**Ключевые слова:** соединение, кластеризация, маршрутизация, протокол связи, дестабилизирующий фактор, преднамеренные помехи, PNNI, MPLS.

### Актуальность

На современном этапе развития систем спутниковой связи (ССС) пристальное внимание уделяется возможностям применения в них технологий пакетной передачи данных. В рамках направлений модернизации транспортной сети на основе СССР рассматривается, возможности внедрения технологии АТМ (Asynchronous Transfer Mode), которая позволит на начальном этапе реализовать поддержку цифровых пакетных потоков, а в дальнейшем осуществить переход к полноценной системе поддержки мультисервисного

обслуживания пакетного трафика в ССС [1, 2]. Вместе с тем, специфика физической среды передачи в ССС (наличие быстрых и медленных замираний сигнала, зависимость условий распространения сигналов от состояния ионосферы и др.), а также то, что в отечественной практике впервые реализуется ССС с АТМ актуализирует необходимость глубокого изучения вопросов устойчивости ССС с применением этой технологии.

Таким образом, в качестве базового объекта исследования в статье рассматривается соединение АТМ. Однако в связи с выделением технологических решений PNNI и MPLS из технологии АТМ в самостоятельные протоколы, данный материал актуален и для других сетей (например IP/MPLS или ASON/ASTN) основанных на протоколах маршрутизации с установлением соединения и коммутацией по меткам.

Для маршрутизации в АТМ сетях используются следующие протоколы [3, 4, 5]:

- PNNI (Private Network-to-Network Interface) – для установления и управления соединениями;
- MPLS (Multi Protocol Label Switching) – для передачи информационных потоков;
- Hello – для контроля связей с соседними логическими узлами на обоих концах соединения и выявления отказов каналов связи.

В рамках данной работы рассмотрен процесс функционирования протокола Hello, одной из задач которого является своевременное определение отказов каналов и узлов связи в соединении. Также разработаны предложения по модификации протокола Hello. Разработанные предложения позволяют повысить устойчивости связи (по показателю коэффициента готовности соединения) за счет адаптивного выбора периода обмена сообщениями Hello между абонентами соединения, для диагностики фактов отказа каналов или узлов связи в сети, подверженной воздействию дестабилизирующих факторов (ДФ).

Под устойчивостью связи, согласно ГОСТ 5311-2008 [6], понимается способность системы связи (СС) выполнять свои функции при выходе из строя части ее элементов в результате воздействия ДФ. Под ДФ понимаются воздействия на СС, источником которых является физический или технологический процесс внутреннего или внешнего характера, приводящие к выходу из строя элементов СС. В соответствии с этим различают [6, 7]:

- внутренние ДФ;
- внешние ДФ.

При этом способность СС противостоять внутренним ДФ определяет свойство надежности, а способность противостоять внешним ДФ - свойство живучести. При рассмотрении структурной устойчивости учитываются топология сети, межэлементные связи и надежность характеристики элементов

в, вследствие чего задачи, связанные с анализом структурной устойчивости, можно свести к задачам надежности и устойчивости топологических структур в зависимости от конкретизации понятия

«воздействие ДФ». В общем случае в качестве внешних ДФ выступают естественные и искусственные помехи: быстрые и медленные замирания сигналов, многолучевое распространение радиоволн, воздействие средств радиоэлектронного подавления на каналы связи, воздействие оружия на узлы связи и т.д.

Известно большое количество работ посвященных вопросам исследования структурной устойчивости сетевых топологических структур и сетей связи. Среди работ в области структурной устойчивости сетевых топологий стоит выделить исследования: Глухова А.Д. [8], Батуриной Л.Н., Лепешинского Н.А. [9], Полесского В.П. [10], Птицына Г.А. [11, 12], Попкова В.К. [13, 14], Громова Ю.Ю. [15, 39], Драчева В.О., Набатова К.А., Иванова О.Г. [15], Грызунова В.В. [16], Егунова М.М. Шувалова В.П. [17], Додонова А.Г., Ландэ Д.В. [18], Долгова А.А., Хорохорина М.А. [39], Минина Ю.В. [39, 40], Елисеева А.И. [40]. В данных работах приводятся показатели структурной связности графов в условиях потери реберной или вершинной связности, а также методы повышения устойчивости топологических структур. К исследованиям в области повышения структурной устойчивости и живучести сетей связи стоит отнести работы: Стельченка В.Ф., Шостак А.В. [19], Зеленцова В.А. Гагина А.А. [20], Новикова С.Н., Бутова А.А., Киселева А.А., Сафонова Е.В., Солонской О.И. [21], Кораблина М.А. Хамитовой Л.А. [22], Рудь Д.Е. [23], Милованова Д.С., Тухтамирзаева А.Ю., Шамина П.Ю. [24], Батаева Р.А., Голубева А.С. [25], Дмитриева В.Н., Сорокина А.А., Пищина О.Н. [26], Нижарадзе Т. З. [27, 28]. В этих работах рассмотрены вопросы повышения надежности сетей связи за счет резервных соединений, повышения функциональности протоколов маршрутизации в направлении увеличения их быстродействия, более оперативной реакции протоколов маршрутизации на отказы сети. Однако решения в вышеприведенных работах не выходят за рамки топологических параметров сетей. В них не рассмотрены вероятностно-временные показатели процессов реконфигурации сетей в условиях отказов элементов, а также отсутствуют модели позволяющие связать процессы функционирования сетевых соединений с их топологической структурой.

Данная работа направлена на устранения недостатка в имеющемся научно-методическом аппарате оценки устойчивости сетей связи. Основной упор сделан на учет в составе показателя устойчивости сетевого соединения вероятностно-временных показателей его реконфигурации при отказе его элементов. Данная работа является логичным продолжением ранее опубликованных работ авторов в области исследования устойчивости систем связи в условиях воздействия дестабилизирующих факторов [7, 29, 30]. В основу используемой в статье модели положено развитие абстрактной модели объекта связи ранее опубликованной в работе [29], с учетом подходов к моделированию представленных в работе [5].

### Постановка задачи

Введем следующие обозначения для формализации процесса функционирования соединения (при допущении о пуассоновском характере процесса отказов/восстановления отдельных элементов соединения):

$S_0, S_1, S_2, S_3$  – состояния, в которых находится соединение в процессе своего функционирования;

$\lambda_{отк\ v}$  – интенсивность отказов  $v$ -го элемента в соединении;

$\mu_{вост\ v}$  – интенсивность восстановления  $v$ -го элемента в соединении;

$T_{отк\ v} = 1/\lambda_{отк\ v}$  – средняя наработка на отказ  $v$ -го элемента в соединении;

$T_{вост\ v} = 1/\mu_{вост\ v}$  – среднее время восстановления  $v$ -го элемента соединения;

$K_{Г\ v} = T_{отк\ v} / (T_{отк\ v} + T_{вост\ v})$  – коэффициент готовности  $v$ -го элемента в соединении;

$z_j$  – количество элементов в  $j$ -ом пути соединения;

$j = 1 \dots J$  – номер пути в соединении;

$J$  – общее количество путей в соединении;

$d$  – количество доменов в соединении;

$K_{Г\ стр}$  – коэффициент готовности структуры соединения, с учетом коэффициентов готовности ее отдельных элементов  $K_{Г\ v}$ ;

$T_{диагн}$  – период диагностики состояния работоспособности элементов соединения;

$T_{ож}$  – временной интервал ожидания восстановления связи в соединении при отказе любого из элементов;

$T_{рек}$  – время реконфигурации соединения в интересах восстановления связи.

$K_{Г\ функ}$  – коэффициент готовности соединения, с учетом процесса его реконфигурации при отказе элементов;

$K_{Г\ соед}$  – итоговый коэффициент готовности соединения, с учетом структуры его построения и процесса реконфигурации при отказах элементов.

Задачей работы является нахождение такого значения периода  $T_{диагн}$  для отправки пакетов Hello с целью диагностики состояния работоспособности соединения, которое бы обеспечило заданный уровень коэффициента готовности соединения  $K_{Г\ соед}$ , с учетом параметров процесса его реконфигурации ( $T_{ож}$ ;  $T_{рек}$ ;  $T_{диагн}$ ), при заданных показателях ( $\lambda_{отк\ v}$ ;  $\mu_{вост\ v}$ ;  $K_{Г\ v}$ ) процесса отказов/восстановлений элементов соединений.

В формальном виде задачу можно представить в следующем виде. Требуется найти множество допустимых значений показателей процесса функционирования соединения  $D\{T_{диагн}; T_{ож}; T_{рек}\}$  которое бы обеспечивало заданное значение коэффициента готовности соединения  $K_{Г\ соед}$ , в условиях заданных значений параметров процесса отказов/восстановлений составных элементов соединения  $\{\lambda_{отк\ v}; \mu_{вост\ v}; K_{Г\ v}\}$ :

$$D(T_{диагн}; T_{ож}) = \arg K_{Г\ соед}(\lambda_{отк\ v}; \mu_{вост\ v}; T_{ож}; T_{рек}; T_{диагн}) \left\{ \begin{array}{l} K_{Г\ соед} \geq K_{Г\ соед}^{зад} \\ \lambda_{отк\ v} = \text{var} \\ \mu_{вост\ v} = \text{var} \\ T_{рек} = \text{const} \end{array} \right.$$

Процесс решения данной задачи может быть декомпозирован на частные подзадачи:

- 1) оценка суммарного коэффициент готовности для структуры соединения  $K_{Г\text{стр}}$ , с учетом коэффициентов готовности ее отдельных элементов  $K_{Гv}$ ;
- 2) формализация процесса функционирования соединения с учетом его реконфигурации при отказе ее отдельных элементов в виде модели;
- 3) вывод аналитической зависимости для коэффициента готовности соединения  $K_{Г\text{функ}}$ , с учетом значений периода диагностики состояния работоспособности соединения  $T_{\text{диагн}}$ ;
- 4) формирование области допустимых значений диагностики состояния работоспособности соединения  $T_{\text{диагн}}$ , а также времени ожидания восстановления связи  $T_{\text{ож}}$ , обеспечивающих заданное значение коэффициента готовности соединения  $K_{Г\text{соед}}$ , с учетом процесса его реконфигурации.

### Оценка коэффициента готовности с учетом структуры соединения

Рассмотрим структуру соединения на информационном направлении связи (ИНС).

Как показал анализ протоколов маршрутизации с установлением соединения [32, 33, 34] в настоящее время среди них преобладают однопутевые соединения (в частности к ним относится протокол PNNI) которые строятся на основе алгоритмов поиска кратчайших путей, преимущественно алгоритмов Дейкстры или Беллмана-Форда [34]. В этом случае соединение может быть представлено последовательным соединением элементов (рис. 1).

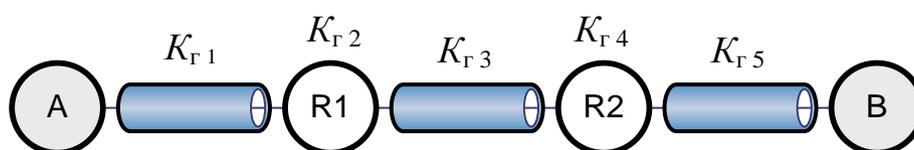


Рис. 1. Соединение с последовательным соединением элементов

Под элементом соединения понимается канал или узел связи, имеющий собственные значения устойчивости к воздействию внешних ДФ, определяемых показателем коэффициента готовности в соответствии с методикой [7].

В случае последовательного соединения элементов, применяя известные выражения из теории надежности, получим суммарный коэффициент готовности для структуры соединения  $K_{Г\text{стр}}$ , с учетом коэффициентов готовности ее отдельных элементов  $K_{Гv} = T_{\text{отк } v} / (T_{\text{отк } v} + T_{\text{вост } v}) = \mu_{\text{вост } v} / (\mu_{\text{вост } v} + \lambda_{\text{отк } v})$  [35]:

$$K_{Г\text{стр}} = \prod_{v=1}^{z_1} K_{Гv}, \quad (1)$$

Вместе с однопутевыми соединениями в практике связи применяются многопутевые соединения, основанные на алгоритмах поиска нескольких путей

к узлу назначения, например алгоритм Йена [28, 41], или алгоритм, предложенный в работе [36]. В случае независимости элементов путей (отсутствие пересечений) такое соединение имеет вид представленный на рис. 2.

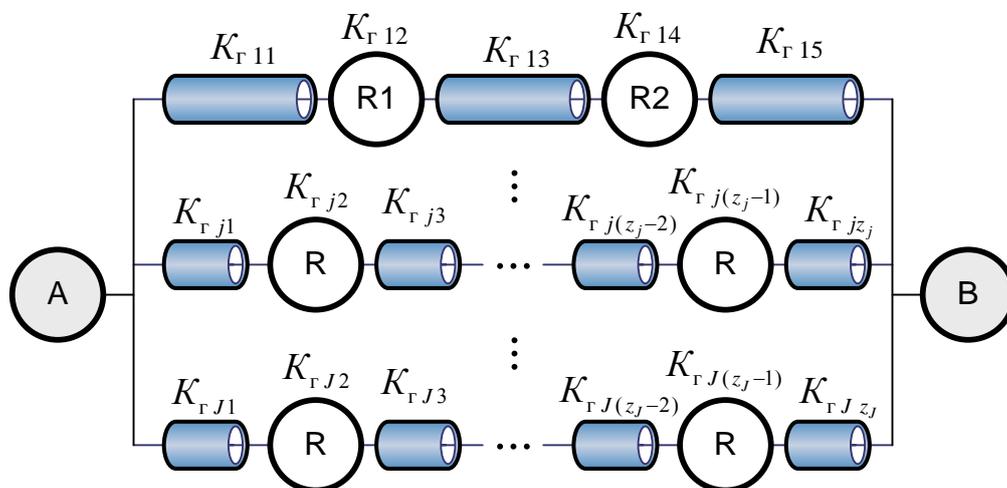


Рис. 2. Соединение с параллельно-последовательным соединением элементов

В случае независимости элементов путей в соединениях и отсутствии пересечений, применяя известные выражения из теории надежности, получим суммарный коэффициент готовности для такой структуры соединения  $K_{Г\text{стр}}$  [35]:

$$K_{Г\text{стр}} = 1 - \prod_{j=1}^J \left( 1 - \prod_{v=1}^{z_j} K_{Гv} \right), \quad (2)$$

В случае смешанной структуры путей, в том числе при наличии их пересечений, получим структуру, представленную на рис. 3. Для такой структуры путей в составе соединения применяется его разбиение на отдельные последовательно объединенные области с последующим вычислением коэффициента готовности сначала внутри такой области, затем в целом за соединение.

На практике вид, представленный на рис. 3, имеют соединения, устанавливаемые 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 – граничным маршрутизаторам. Дополнительные пути в каждом домене для схем соединений на рис. 2 и 3 соответствуют принципу резервирования соединений 1+1 или 1:1 [37].

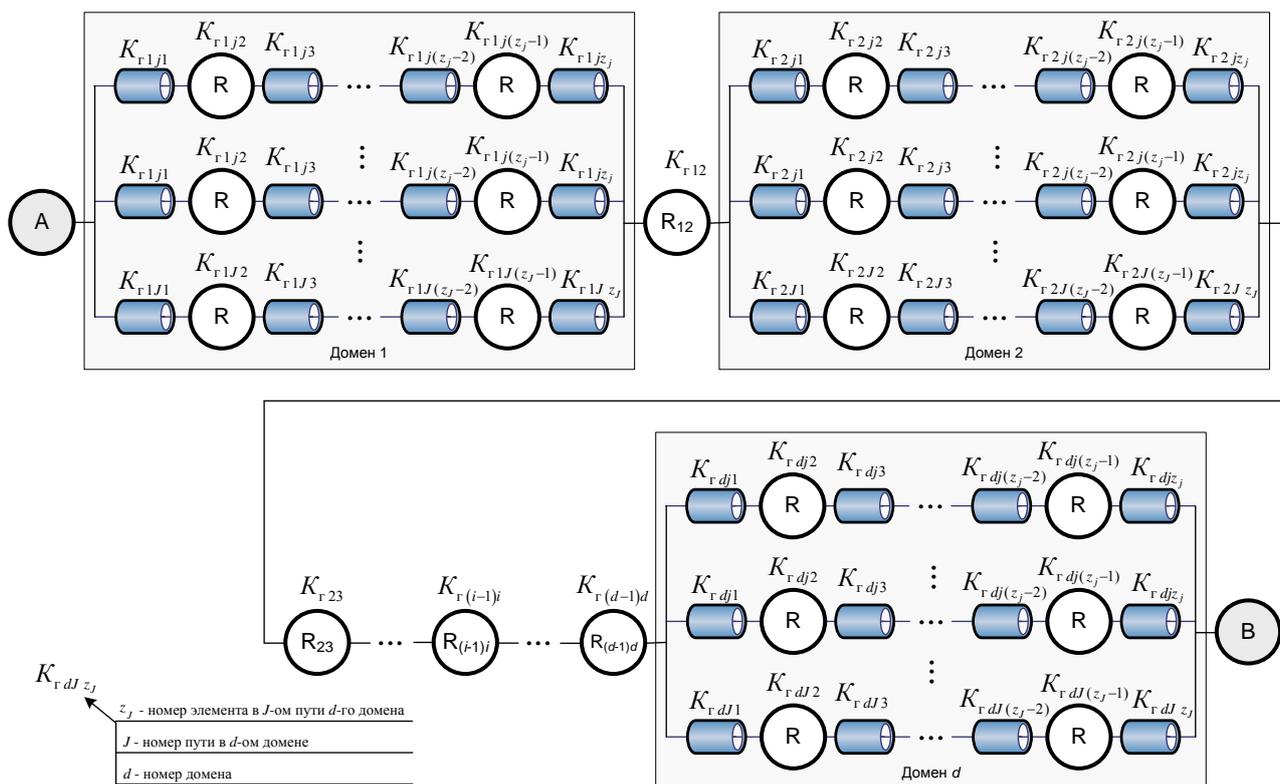


Рис. 3. Соединение со смешанной структурой

На основе известных выражений из теории надежности с учетом выражений (1) и (2), получим суммарный коэффициент готовности для такой структуры соединения  $K_{Г\text{стр}}$ :

$$K_{Г\text{стр}} = \prod_{i=1}^d \left( 1 - \prod_{j=1}^{J_i} \left( 1 - \prod_{v=1}^{z_j} K_{Гv} \right) \right) \cdot \prod_{i=1}^{d-1} K_{Гi(i+1)}, \quad (3)$$

где первая часть произведения определяет коэффициенты готовности доменов, а вторая – коэффициенты готовности граничных маршрутизаторов.

Выражения (1-3) определяют коэффициенты готовности соединения, обусловленные его структурным построением. Однако существенную роль в определении коэффициента готовности соединения играют временные параметры его функционирования и его реакции на отказ, которые не учитываются в выражениях (1-3). Выражения для структурного построения соединения определяют долю времени работоспособного состояния соединения, при отказе ее отдельных элементов с учетом времени на восстановление элементов. Однако необходимо также учесть время реакции протокола сигнализации на диагностику отказа и восстановление связи (или реконфигурацию). Такой учет предлагается провести через введение в итоговый показатель готовности соединения дополнительного множителя определяющего временные параметры реакции протокола сигнализации, на отказ элемента соединения:

$$K_{Г\text{соед}} = K_{Г\text{стр}} \cdot K_{Г\text{функ}} \cdot \quad (4)$$

### Формализация процесса функционирования соединения с учетом его реконфигурации при отказе отдельных элементов

Определим коэффициент готовности соединения  $K_{Г\text{ функ}}$ , с учетом параметров его функционирования. За основу формализации процесса функционирования соединения примем модель представленную в работе [29].

В этом случае отказ любого элемента (канала связи или узла маршрутизации/коммутации) соединения проходит через следующую последовательность смены состояний: работоспособен – отказ элемента – ожидание восстановления связи – изменение (реконфигурация/коррекция) собственных параметров в интересах восстановления работоспособности – работоспособен.

Введем допущения:

- поток отказов элементов обладает свойством ординарности;
- за цикл функционирования соединения, обусловленный отказом его элемента, отказы других элементов не происходят;
- отказом соединения считается отказ элемента с минимальным коэффициентом готовности  $\min\{K_{Г\text{ в}}\}$ ;
- моменты отказов/восстановлений элементов соответствуют простейшему потоку событий и имеют экспоненциальное распределение длительностей  $T_{\text{отк в}}$  и  $T_{\text{вост в}}$ ;
- время отказа элемента  $T_{\text{отк}}$  и время восстановления элемента  $T_{\text{вост}}$  соответствуют временным параметрам надежности элемента с минимальным коэффициентом готовности  $\min\{K_{Г\text{ в}}\}$ .

В отдельных случаях, как например, в случаях рассматриваемых в работе [31], при рассмотрении процесса функционирования соединений с протоколами маршрутизации, адаптивными к изменению метрики каналов связи, отказом может считаться изменение метрики канала достаточное для запуска процесса реконфигурации соединения. В этом случае, целесообразно использовать временные параметры  $T_{\text{отк}}$  и  $T_{\text{вост}}$  соответствующие временным параметрам надежности элемента с максимальной интенсивностью изменения метрики  $\max\{\lambda_{M\text{ в}}\}$  [31].

Данные допущения позволяют получить результаты соответствующие наихудшим (по временным параметрам) показателям надежности элементов, и получить граничные оценки коэффициента готовности соединения  $K_{Г\text{ функ}}$  в процессе его функционирования.

Формализуем, рассматриваемый процесс функционирования соединения в виде марковского процесса смены состояний (рис. 4).

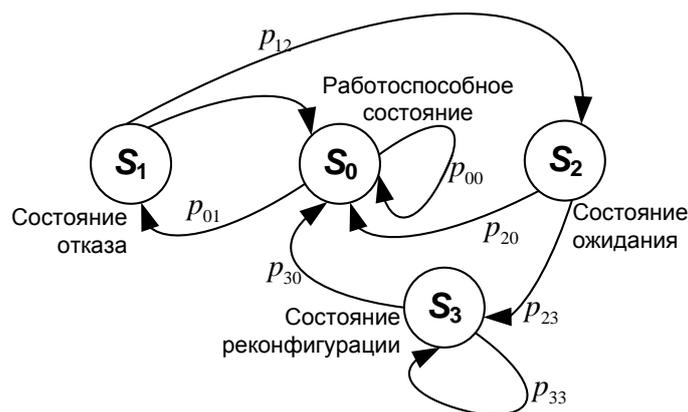


Рис. 4. Формализованный марковский процесс функционирования соединения в условиях отказов его элементов

В представленной модели процесс функционирования соединения представлен в виде последовательности перехода между различными состояниями:

- $S_0$  – «работоспособное состояние» соединения;
- $S_1$  – «состояние отказа», когда в соединении отказ элемента еще не определен и соединение продолжает использовать свой элемент как работоспособный;
- $S_2$  – «состояние ожидания», когда соединение диагностировало отказ элемента, но ожидает восстановления связи (в связи с восстановлением элемента);
- $S_3$  – «состояние реконфигурации», когда соединение диагностировало, что восстановление отказавшего элемента не произошло, и запущен процесс изменения собственных параметров в интересах восстановления работоспособности.

В начальный момент времени соединение находится в «работоспособном состоянии». В случае отказа элемента оно переходит в состояние «состояние отказа»  $S_0 \rightarrow S_1$ . Если за период диагностики  $T_{\text{диагн}}$  элемент успел отказать и восстановиться ( $T_{\text{диагн}} > T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}$ ), то система возвращается в «работоспособное состояние»  $S_1 \rightarrow S_0$ . Если за время  $T_{\text{диагн}}$  элемент не успел восстановиться ( $T_{\text{диагн}} < T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}$ ), то соединение диагностирует отказ элемента и переходит  $S_1 \rightarrow S_2$  в «состояние ожидания». Если за время ожидания элемент восстановится ( $T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} > T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}$ ), то соединение переходит  $S_2 \rightarrow S_0$  в «работоспособное состояние», в противном случае ( $T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} < T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}$ ) оно переходит  $S_2 \rightarrow S_3$  в «состояние реконфигурации», после чего восстанавливает свое «работоспособное состояние»  $S_3 \rightarrow S_0$ .

Параметры переходов  $S_i \rightarrow S_j$  определяются вероятностями  $p_{ij}$  зависящих от вероятности отказа  $P_{\text{отк}}(t)$  и вероятности восстановления  $P_{\text{вост}}(t)$  отдельных элементов за время  $t$ , а также от временных параметров соединения: времени диагностики отказа элемента  $T_{\text{диагн}}$ , времени ожидания восстановления связи  $T_{\text{ож}}$ , времени изменения (реконфигурация/коррекция) собственных параметров в интересах восстановления работоспособности  $T_{\text{рек}}$ .

Для перехода от временных параметров  $T_{отк}=1/\lambda_{отк}$ ,  $T_{вост}=1/\mu_{вост}$  к безразмерному показателю – коэффициенту готовности  $K_{г}=T_{отк}/(T_{отк}+T_{вост})$ , через заранее определенное значение  $T_{отк}$  используем систему:

$$\begin{cases} T_{отк} = const \\ K_{г} = const \\ T_{вост} = \frac{T_{отк}}{K_{г}} - T_{отк} \end{cases} . \quad (5)$$

Фактически значение  $K_{г}$  в выражении (5) соответствует коэффициенту готовности элемента с минимальным коэффициентом готовности  $\min\{K_{г.v}\}$ . С учетом допущения (5) введем следующие функции для переходных вероятностей  $p_{ij}$  в зависимости от параметров отказа/восстановления соединения  $T_{отк}$ ,  $T_{вост}$  ( $K_{г}$ ).

Вероятность  $p_{00}$  того, что интервал диагностики  $T_{диагн}$  меньше времени наработки до отказа  $T_{отк}$ , то есть элемент соединения за время диагностики не отказал и продолжает работать (рис. 5):

$$p_{00} = P(T_{диагн} < T_{отк}) = e^{-\frac{1}{T_{отк}}T_{диагн}} . \quad (6)$$

Вероятность  $p_{01}$  того, что интервал диагностики  $T_{диагн}$  больше времени наработки до отказа  $T_{отк}$ , то есть элемент за время диагностики  $T_{диагн}$  отказал и во время проведения диагностики соединение определило этот отказ - система перешла в «состояние отказа»:

$$p_{01} = P(T_{диагн} \geq T_{отк}) = 1 - e^{-\frac{1}{T_{отк}}T_{диагн}} . \quad (7)$$

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

$$p_{10} = P(T_{диагн} > T_{отк} + T_{вост}) = 1 - e^{-\frac{1}{T_{отк}+T_{вост}}T_{диагн}} . \quad (8)$$

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

$$p_{12} = P(T_{диагн} \leq T_{отк} + T_{вост}) = e^{-\frac{1}{T_{отк}+T_{вост}}T_{диагн}} . \quad (9)$$

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

$$p_{20} = P(T_{диагн} + T_{ож} > T_{отк} + T_{вост}) = 1 - e^{-\frac{1}{T_{отк}+T_{вост}}(T_{диагн}+T_{ож})} . \quad (10)$$

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

$$p_{23} = P(T_{диагн} + T_{ож} \leq T_{отк} + T_{вост}) = e^{-\frac{1}{T_{отк}+T_{вост}}(T_{диагн}+T_{ож})} . \quad (11)$$

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

$$p_{30} = P(t > T_{рек}) = e^{-1}, \quad (12)$$

а вероятность того, что за то же время  $T_{рек}$  продолжается реконфигурация:

$$p_{33} = P(t < T_{рек}) = 1 - e^{-1}. \quad (13)$$

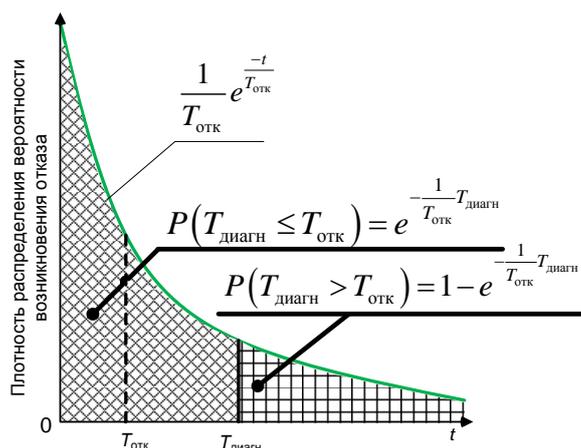


Рис. 5. Пояснение к определению переходных вероятностей на основе экспоненциального распределения  $T_{отк}$  и  $T_{вост}$

Формализация функционирования соединения 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(S_0) = \frac{P_{30}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}} \\ P(S_1) = \frac{P_{01}P_{30}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}} \\ P(S_2) = \frac{P_{01}P_{12}P_{30}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}} \\ P(S_3) = \frac{P_{01}P_{12}P_{23}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}} \\ P(S_0) + P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) = 1 \end{array} \right. \quad (14)$$

Проведем исследование изменения переходных вероятностей  $p_{ij}$  в системе формализующей соединение в следующих типовых ситуациях.

1. Период диагностики отказа в соединении  $T_{\text{диагн}}$  намного меньше наработки на отказ  $T_{\text{отк}}$  и времени восстановления  $T_{\text{вост}}$  элемента, например  $T_{\text{диагн}}=0,01$ ;  $T_{\text{отк}}=1$ ;  $T_{\text{вост}}=0,25$  ( $K_{\Gamma}=0,8$ ). В этом случае вероятность того, что за время  $T_{\text{диагн}}$  элемент откажет, очень низка, что обуславливает значение  $p_{00} \rightarrow 1$  и соответственно значение  $P(S_0) \rightarrow 1$ . Однако если же отказ элемента наступает, то происходит своевременная его диагностика и система из работоспособного состояния  $S_0$  переходит в состояние отказа  $S_1$  из которого без потерь времени на ожидание восстановления связи переходит в состояние реконфигурации системы  $S_3$  с последующим возвращением в работоспособное состояние  $S_0$  (рис. 6а).

2. Период диагностики отказа в соединении  $T_{\text{диагн}}$  сопоставим с наработкой на отказ элемента  $T_{\text{отк}}$ , его временем восстановления  $T_{\text{вост}}$ , а также с временем ожидания восстановления связи  $T_{\text{ож}}$   $T_{\text{диагн}} \approx (1/\lambda_{\text{отк}}) + (1/\mu_{\text{вост}}) \approx T_{\text{ож}}$ . Например (рис. 6б):  $T_{\text{диагн}}=0,8$ ;  $T_{\text{ож}}=1,25$ ;  $T_{\text{отк}}=1$ ;  $T_{\text{вост}}=0,25$  ( $K_{\Gamma}=0,8$ ). В этом случае при отказе элемента соединения происходит своевременная его диагностика, и система из работоспособного состояния  $S_0$  переходит в состояние отказа  $S_1$ . Из состояния отказа  $S_1$  после ожидания восстановления связи в течении  $T_{\text{ож}}$  система переходит в состояние реконфигурации  $S_3$  с последующим возвращением в работоспособное состояние  $S_0$  (в случае если система не успела восстановиться за время ожидания  $T_{\text{ож}}$ ). В случае если на время ожидания  $T_{\text{ож}}$  элемент соединения успел восстановиться, система сразу же переходит в состояние  $S_0$ .

3. Период диагностики отказа в соединении  $T_{\text{диагн}}$  намного больше наработки на отказ  $T_{\text{отк}}$  и времени восстановления элемента  $T_{\text{вост}}$ . Например:  $T_{\text{диагн}}=5$ ,  $T_{\text{ож}}=5$ ,  $T_{\text{отк}}=1$ ,  $T_{\text{вост}}=0,25$  ( $K_{\Gamma}=0,8$ ). В этом случае при отказе элемента не происходит своевременная его диагностика и система из работоспособного состояния  $S_0$  переходит в состояние отказа  $S_1$  из которого не может перейти в состояние реконфигурации  $S_3$  (через состояние  $S_2$ ), а, следовательно, и в работоспособное состояние  $S_0$ , ожидая пока истечет очередной период

диагностики. При этом существенно повышается вероятность  $p_{10}$ , что система за время  $T_{\text{диагн}}$  успеет самостоятельно восстановиться. Фактически такое состояние соответствует «необнаруженному отказу», так как при наступлении отказа элемента до истечения периода очередного периода диагностики  $T_{\text{диагн}}$  система находится как бы в работоспособном состоянии и продолжает использовать отказавший элемент (рис. 6в).

Переходные вероятности  $p_{ij}$  и конечные вероятности  $P(S_i)$  нахождения в состояниях  $S_i$  для вышерассмотренных типовых ситуаций и при указанных ограничениях приведены на рис. 6.

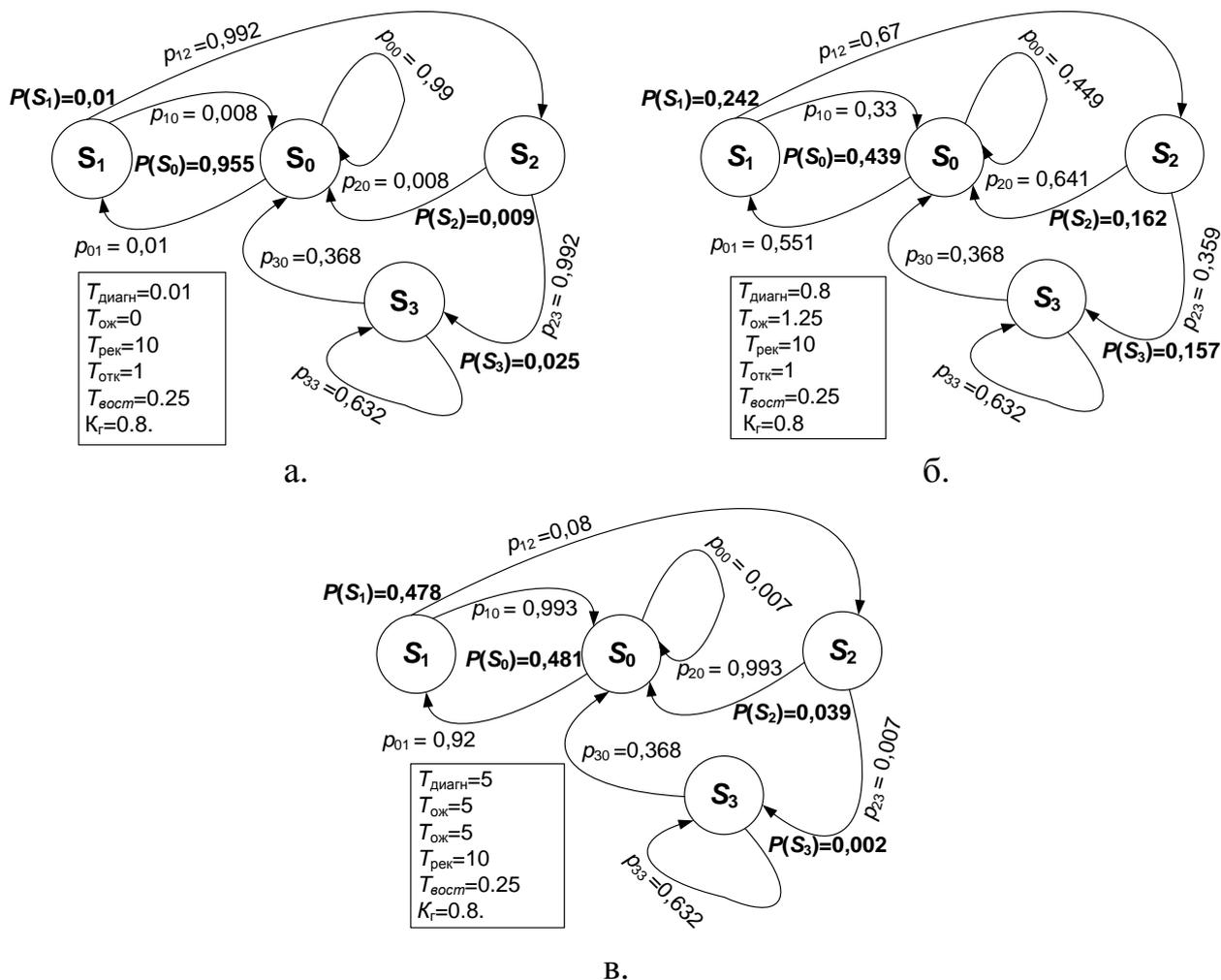


Рис. 6. Переходные вероятности  $p_{ij}$  и конечные вероятности  $P(S_i)$  нахождения в состояниях  $S_i$  для вышерассмотренных типовых ситуаций

Исследуем поведение конечных вероятностей состояний системы  $P(S_i)$ , определяемых в соответствии с выражениями (6-14). Результаты исследования зависимости  $P(S_i)$  от значений  $T_{\text{диагн}}$  и  $T_{\text{ож}}$ , нормированных к наработке элемента на отказ  $T_{\text{отк}}=1/\lambda_{\text{отк}}$ , при различных значениях  $K_r$  с учетом следующих ограничений:  $T_{\text{отк}}=1$ ;  $T_{\text{диагн}}=1T_{\text{отк}}\dots 3T_{\text{отк}}$ ;  $T_{\text{ож}}=1T_{\text{диагн}}\dots 5T_{\text{диагн}}$ ;  $T_{\text{рек}}=10T_{\text{отк}}$ ;  $K_r=0,5, 0,8, 0,99$  приведены на рис. 7.

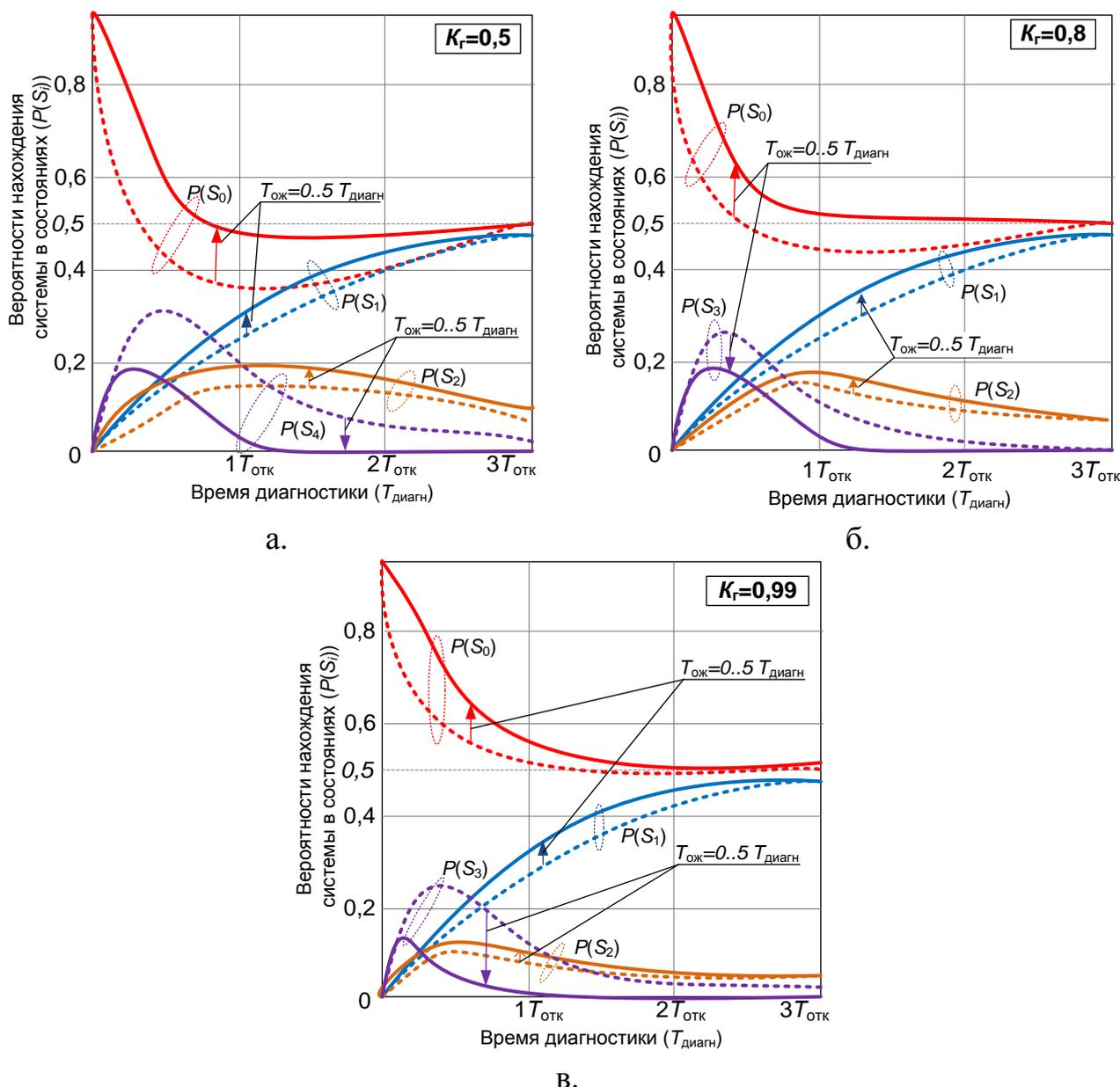


Рис. 7. Зависимости конечных вероятностей состояний системы  $P(S_i)$  от  $T_{\text{диагн}}$ ,  $T_{\text{ож}}$ ,  $K_{\Gamma}$

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 7, позволяет сделать следующие выводы.

1. Отношение  $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}}$  влияет на быстроту схождения  $P(S_i)$  к предельному значению. При  $T_{\text{ож}} = 0T_{\text{диагн}}$ , значения  $P(S_0)$ ,  $P(S_1)$ ,  $P(S_2)$  достигают своего минимального значения, а  $P(S_3)$  – максимального. Увеличение значения  $T_{\text{ож}}$  соответствует снижению «уровня чувствительности» системы к отказам (что выражается в повышенном значении  $P(S_0)$ ), однако при  $T_{\text{диагн}} \geq 2T_{\text{отк}}$  данный «уровень чувствительности» становится инвариантным к изменению  $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}}$ .

2. При увеличении значений  $T_{\text{диагн}}$  вероятность работоспособного состояния  $P(S_0)$  снижается и стремится к своему предельному значению  $P(S_0) \rightarrow 0,5$ . При этом значения  $K_{\Gamma}$  определяют наличие и значение минимума функции  $P(S_0)$ .

3. При увеличении значений  $T_{\text{диагн}}$  вероятность нахождения в состоянии отказа  $P(S_1)$  повышается и стремится к предельному значению  $P(S_1) \rightarrow 0,5$ . При этом изменение значения  $K_r$  практически не оказывают влияния на вероятность нахождения системы в состоянии отказа  $P(S_1)$ .

4. График вероятности нахождения в состоянии ожидания восстановления связи  $P(S_2)$  является выпуклым и стремится к своему предельному значению  $P(S_2) \rightarrow 0$  при увеличении  $T_{\text{диагн}}$ , при этом в зависимости от значения  $K_r$  меняется расположение и значение максимума функции  $P(S_2)$ .

5. График вероятности нахождения системы в состоянии реконфигурации ( $P(S_3)$ ) также является выпуклым и стремится к предельному значению  $P(S_3) \rightarrow 0$  при увеличении  $T_{\text{диагн}}$ . Аналогично  $P(S_2)$ , в зависимости от значения  $K_r$  меняется максимально достигаемое значение  $P(S_3)$ .

6. Уже при значениях  $T_{\text{диагн}} = 0,3T_{\text{отк}}$  ( $T_{\text{ож}} = 5T_{\text{диагн}}$ ) значение вероятности нахождения в работоспособном состоянии  $P(S_0)$  принимает критическое значение  $P(S_0) = 0,8$ , а при меньшем значении  $T_{\text{ож}} < 5T_{\text{диагн}}$  происходит снижение значений вероятности до  $P(S_0) < 0,8$ , что является неприемлемым показателем для функционирования соединения.

Исследование поведения конечных вероятностей состояний системы  $P(S_i)$  при ограничениях на  $T_{\text{диагн}}$  и  $T_{\text{ож}}$  в зависимости от значений  $K_r$  и отношения  $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк}}$  с учетом следующих ограничений:  $T_{\text{отк}} = 1$ ;  $T_{\text{диагн}} = 0,01T_{\text{отк}}, 0,1T_{\text{отк}}, 0,3T_{\text{отк}}, 1T_{\text{отк}}$ ;  $T_{\text{ож}} = 0T_{\text{диагн}} \dots 5T_{\text{диагн}}$ ;  $T_{\text{рек}} = 10T_{\text{отк}}$ ;  $K_r = 0 \dots 1$  приведены на рис. 8.

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 8, показывает, что при уменьшении  $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк}}$  снижается влияние значения коэффициента готовности элемента  $K_r$  на значение вероятности работоспособного состояния  $P(S_i)$ . А при  $T_{\text{диагн}} \leq 0,01T_{\text{отк}}$  вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии  $P(S_0)$  практически от  $K_r$  не зависит и составляет приемлемые значения  $P(S_0) \geq 0,9$ . Таким образом, повышение коэффициента готовности  $K_r$  путем сокращения времени восстановления элемента  $T_{\text{вос}}$  для повышения  $P(S_0)$  целесообразно лишь при значениях периода диагностики  $T_{\text{диагн}} \geq 0,08T_{\text{отк}}$ .

С ростом периода ожидания восстановления связи  $T_{\text{ож}}$ , растет вероятность работоспособного состояния  $P(S_0)$ , так как в этом случае возрастает переходная вероятность  $p_{20}$ , то есть увеличивается вероятность того, что система успеет перейти из состояния ожидания  $S_2$  в работоспособное состояние  $S_0$  минуя состояние реконфигурации  $S_3$ . В отдельных случаях повышение значения  $T_{\text{ож}}$  от 0 до  $5T_{\text{диагн}}$  позволяет повысить вероятность работоспособного состояния на 15-20%.

Основным параметром, определяющим наиболее сложные условия функционирования соединения, являются значения наработки на отказ элемента удовлетворяющие условию  $T_{\text{отк}} \leq 10T_{\text{диагн}}$ . При этом значения  $T_{\text{отк}}$ , не превышающие значения времени восстановления элемента соединения  $T_{\text{отк}} \leq T_{\text{вос}}$ , снижают коэффициент готовности элемента  $K_r$ . Условия функционирования, соответствующие значениям  $T_{\text{отк}} \leq 10T_{\text{диагн}}$ ,  $T_{\text{отк}} \leq T_{\text{вос}}$  еще более усугубляет деструктивное воздействие отказов элемента на соединение, и минимизирует значение вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии  $P(S_0) \rightarrow \min$ .

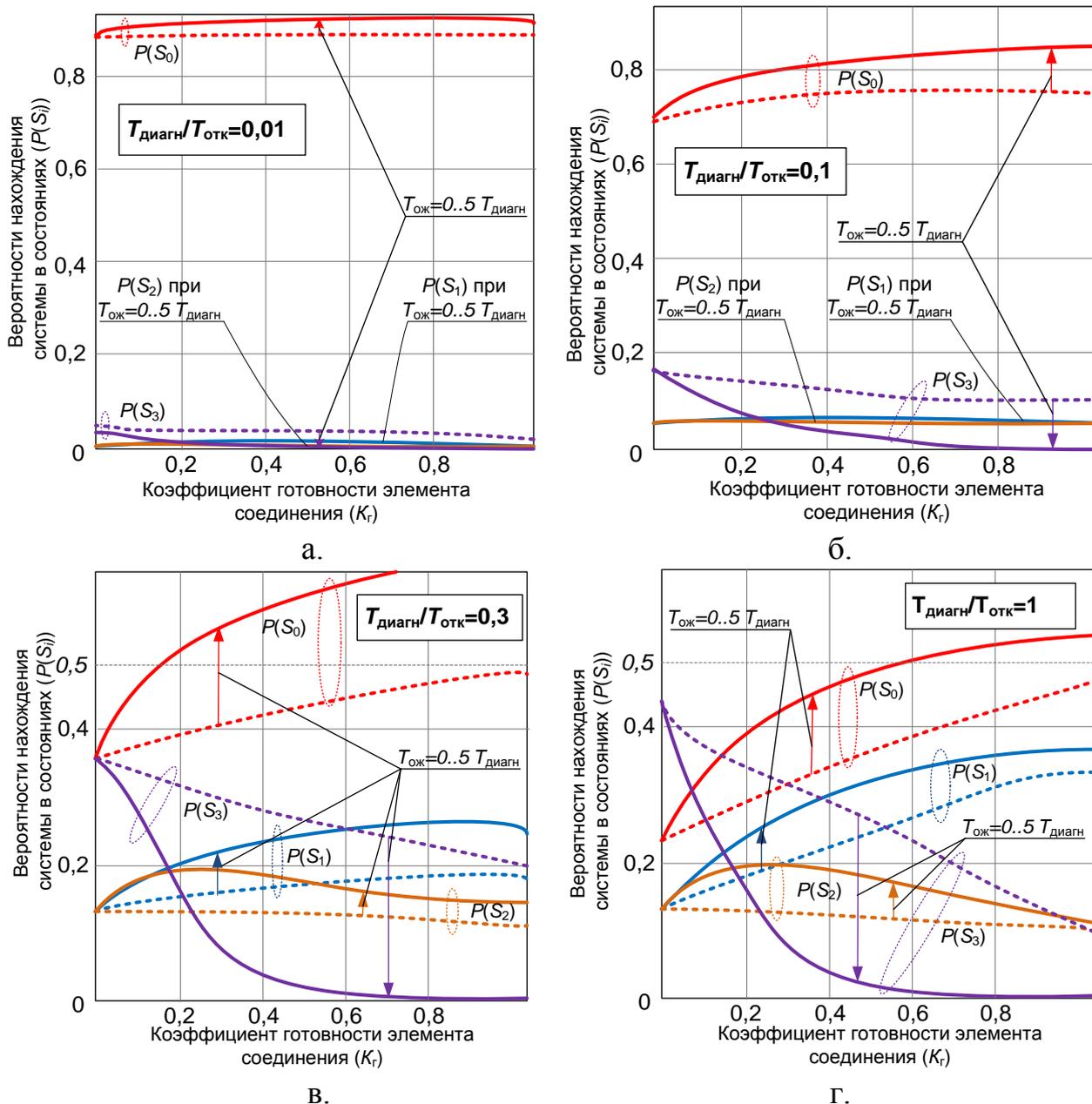


Рис. 8. Зависимость конечных вероятностей состояний от  $K_r$  при фиксированных значениях отношения  $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк}}$

Для решения задачи обоснования временных параметров функционирования соединения из (14), с учетом (6-13), сокращая и приводя подобные, получим выражение для обеспечения заданного уровня вероятности  $P_{\text{зад}}(S_0)$ , который по своему физическому смыслу является коэффициентом готовности соединения  $K_{r \text{ функ}}$ :

$$K_{r \text{ функ}} = P_{\text{зад}}(S_0) = \frac{1}{1 + e \left( 1 - e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} \right) \left( e^{-1} + e^{-\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{восст}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{восст}}}} + e^{-\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{восст}}}} \right)}. \quad (15)$$

Таким образом, общий коэффициент готовности соединения с учетом выражений (4) и (15) будет иметь вид:

$$K_{Г\text{соед}} = \frac{K_{Г\text{стр}}}{1 + e \left( 1 - e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} \right) \left( e^{-1} + e^{-\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} \right)}. \quad (16)$$

Уравнение (16) относительно  $T_{\text{диагн}}$  при заданном значении  $K_{Г\text{функ}}$  является трансцендентным и его аналитическое решение невозможно. Для нахождения значений  $T_{\text{диагн}}$ ,  $T_{\text{ож}}$ , обеспечивающих требуемый уровень  $K_{Г\text{соед}}$ , при заданных значениях: коэффициента готовности структуры соединения  $K_{Г\text{стр}}$ ; времени отказа  $T_{\text{отк}}$  и восстановления  $T_{\text{вост}}$  наименее готового элемента соединения; предлагается воспользоваться численным решением уравнения (16) за счет использования метода Ньютона (метода касательных) [38].

Для применения метода Ньютона представим выражение (16) в виде:

$$f(T_{\text{диагн}}) = \frac{K_{Г\text{стр}}}{1 + e \left( 1 - e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} \right) \left( e^{-1} + e^{-\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} \right)} - K_{Г\text{соед}}^{\text{зад}} = 0 \quad (17)$$

Найдем первую производную от функции  $f(T_{\text{диагн}})$ :

$$f'(T_{\text{диагн}}) = -K_{Г\text{стр}} \left[ \frac{\left( e^{-\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} \right) \left( e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) + T_{\text{отк}} \cdot e^{-\left( e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right)} \right)}{\left( (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) T_{\text{вост}} \left( e^{-\left( e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right)} \right) \left( e^{-\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-1} \right) - 1 \right)^2} + \frac{e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) + T_{\text{отк}} \cdot e^{-\frac{2T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} \left( e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right)}{\left( (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) T_{\text{вост}} \left( e^{-\left( e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right)} \right) \left( e^{-\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-1} \right) - 1 \right)^2} \right]. \quad (18)$$

Найдем вторую производную функции  $f(T_{\text{диагн}})$ :

$$f''(T_{\text{диагн}}) = K_{Г\text{стр}} \left[ \frac{e^{-\frac{T_{\text{ож}} T_{\text{отк}} - T_{\text{отк}}^2 + 3T_{\text{диагн}} T_{\text{отк}} + T_{\text{диагн}} T_{\text{вост}} - T_{\text{отк}} T_{\text{вост}}}{(T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) T_{\text{вост}}}}}{\left( (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) T_{\text{вост}} \left( e^{-\left( e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right)} \right) \left( e^{-\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-1} \right) - 1 \right)^2} + \frac{\left( 2e^{-\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} \right) \left( 2T_{\text{отк}} e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - e T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}} e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} \right)}{\left( (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) T_{\text{вост}}^2 \left( e^{-\left( e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right)} \right) \left( e^{-\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} + e^{-1} \right) - 1 \right)^2} \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}}}{e^{\frac{T_{\text{отк}}}{T_{\text{отк}}}}} + \\
 & T_{\text{вост}}^2 \left( e \left( e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right) \left( e^{\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{-1}} \right) - 1 \right)^2 + \\
 & e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} (2T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) \left( e^{\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} \right) \\
 & + \frac{(T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) T_{\text{вост}}^2 \left( e \left( e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right) \left( e^{\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{-1}} \right) - 1 \right)^2 + \\
 & \left. 2e^{\frac{-T_{\text{ож}} + 2T_{\text{диагн}} + T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} \left( e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right) \right] + \\
 & (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}})^2 \left( e \left( e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right) \left( e^{\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{-1}} \right) - 1 \right)^2 - \\
 & - 2K_{\text{г стр}} \left[ e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} \left( e^{\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{-1}} \right) (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) + \right. \\
 & \left. + e \left( 2e^{\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{-1}} \right) \left( e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right) T_{\text{отк}} \right] \times \\
 & \times \left[ \frac{\left( e^{\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} \right) \left( 2T_{\text{отк}} e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - e T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}} e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} \right)}{\left( (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}})^2 T_{\text{вост}}^2 \left( e \left( e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right) \left( e^{\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{-1}} \right) - 1 \right)^3 + \right.} \\
 & \left. + \frac{e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}) + T_{\text{отк}} e^{\frac{-T_{\text{ож}} + 2T_{\text{диагн}} + T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}}} \left( e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right)}{\left( (T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}})^2 T_{\text{вост}}^2 \left( e \left( e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк}}}} - 1 \right) \left( e^{\frac{-2T_{\text{диагн}} - T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк}} - T_{\text{вост}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{вост}}} + e^{-1}} \right) - 1 \right)^3 \right)} \right] \cdot (18)
 \end{aligned}$$

В соответствии с методом Ньютона [38] выбор начальной точки и направления приближения при построении касательных определяется путем определения произведения производных (18) и (19). В случае если произведение отрицательно:

$$f'(T_{\text{диагн}}) f''(T_{\text{диагн}}) < 0,$$

то приближение осуществляется слева, если положительно:

$$f'(T_{\text{диагн}}) f''(T_{\text{диагн}}) > 0,$$

– то справа.

Задается искомая точность поиска корня  $\varepsilon$ . Итерационная процедура поиска численного решения заключается в последовательном нахождении значений  $T_{\text{диагн } n+1}$ :

$$T_{\text{диагн } n+1} = T_{\text{диагн } n} - \frac{f(T_{\text{диагн } n})}{f'(T_{\text{диагн } n})}, \quad (19)$$

пока не будет выполнен критерий достижения заданной точности:

$$|T_{\text{диагн } n+1} - T_{\text{диагн } n}| \leq \varepsilon,$$

или

$$\left| \frac{f(T_{\text{диагн } n})}{f'(T_{\text{диагн } n})} \right| \leq \varepsilon.$$

В соответствии с физическим смыслом выражения  $T_{\text{диагн}}$  начальное приближение для поиска решения  $f(T_{\text{диагн}})=0$ , выбирается  $T_{\text{диагн } 0}=0$ . Программная реализация итерационной процедуры численного поиска решения для Mathcad представлена в приложении 1.

Значение  $T_{\text{диагн}}$  являющееся решением уравнения  $f(T_{\text{диагн}})=0$  задаваемого выражением (17) определяет необходимую периодичность отправки пакетов сигнализации для контроля соединения «из конца в конец» с учетом структуры соединения (которое учитывается через коэффициент  $K_{\text{Г стр}}$ ) и с учетом процесса его реконфигурации при отказах (учитывается через коэффициент  $K_{\text{Г функ}}$ ). При этом параметры реконфигурации соответствуют наиболее пессимистической оценки надежности элементов соединения. Адаптивное изменение значения  $T_{\text{диагн}}$  позволит обеспечить заданный коэффициент готовности  $K_{\text{Г соед}}$  соединения в целом, как при изменении структуры соединения, так и при изменении надежностных оценок его элементов  $K_{\text{Г}}$ .

### Выводы

Проведенная формализация процесса функционирования соединения показало, что устойчивость соединения к отказам ее отдельных элементов определяется его структурой и периодичностью диагностики связи «из конца в конец» между абонентами, ведущими информационный обмен.

Анализ результатов моделирования показал, что основным параметром, определяющим наиболее сложные условия функционирования соединения при его заданной структуре, являются значения наработки на отказ элемента соединения  $T_{\text{отк}} \leq 10T_{\text{диагн}}$ . При этом значения  $T_{\text{отк}}$ , не превышающие значения времени восстановления элемента соединения  $T_{\text{отк}} \leq T_{\text{вост}}$ , снижают коэффициент готовности элемента  $K_{\text{Г}}$ . Условия функционирования элемента соединения, соответствующие значениям  $T_{\text{отк}} \leq 10T_{\text{диагн}}$ ,  $T_{\text{отк}} \leq T_{\text{вост}}$  существенно усугубляют деструктивное воздействие отказов элемента на устойчивость соединения, и минимизирует значение вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии  $P(S_0) \rightarrow \min$ .

Для обеспечения заданного уровня устойчивости соединения при неизменности его структуры необходимо адаптивно изменять значение

периодичности диагностики связи «из конца в конец»  $T_{\text{диагн}}$ . Это позволит обеспечить заданный коэффициент готовности  $K_{\text{Гсоед}}$  соединения в целом, как при изменении структуры соединения, так и при изменении надежных оценок его элементов. Проведенное моделирование показало, что при обеспечении значений  $T_{\text{диагн}} \leq 0,01 T_{\text{отк}}$  вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии  $K_{\text{Гфунк}}$  практически не зависит от готовности  $K_{\text{Г}}$  элемента и составляет приемлемые значения  $K_{\text{Гфунк}} \geq 0,9$ . При значениях  $T_{\text{диагн}} \geq 0,08 T_{\text{отк}}$  также возможно дополнительно обеспечить повышение коэффициента готовности элемента  $K_{\text{Г}}$  путем сокращения времени восстановления элемента  $T_{\text{вост}}$  при его отказе.

Представленное решение, прежде всего, ориентированно на соединение ATM, однако оно же применимо и для других сетей (например, IP/MPLS или ASON/ASTN) основанных на протоколах маршрутизации с установлением соединения и коммутацией по меткам.

Исследования функционирования протоколов маршрутизации при воздействии на сеть дестабилизирующих факторов выполнены при государственной поддержке РФФИ инициативного научного проекта № 13-07-97518 и поддержке Департаментом приоритетных направлений науки и технологий Минобрнауки РФ – грантом Президента РФ № МК-755.2012.10.

## Приложение 1

### Программная реализация в Mathcad процедуры численного решения методом Ньютона (методом касательных) уравнения (17)

В связи с особенностями программирования в среде MathCad приняты следующие условные обозначения:

1.  $T_{\text{hello}}$  – время диагностики  $T_{\text{диагн}}$ .
2.  $T_{\text{ma}}(T_{\text{hello}})$  – временной интервал ожидания восстановления связи  $T_{\text{ож}}$ .
3.  $r$  – отношение  $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}}$ .
4.  $t_o$  – среднее время работы между отказами  $T_{\text{отк}}$ .
5.  $t_v$  – среднее время восстановления  $T_{\text{вост}}$ .
6.  $p_{00}(T_{\text{hello}}) \dots p_{33}(T_{\text{hello}})$  – переходные вероятности согласно рис. 4.
7.  $s_{\text{зад}}$  – заданное значение коэффициента готовности.
8.  $K_{\text{СТР}}$  – коэффициент готовности структурный ( $K_{\text{Гстр}}$ ).
9.  $s_0(T_{\text{hello}})$  – значение коэффициента готовности.

Исходные данные:

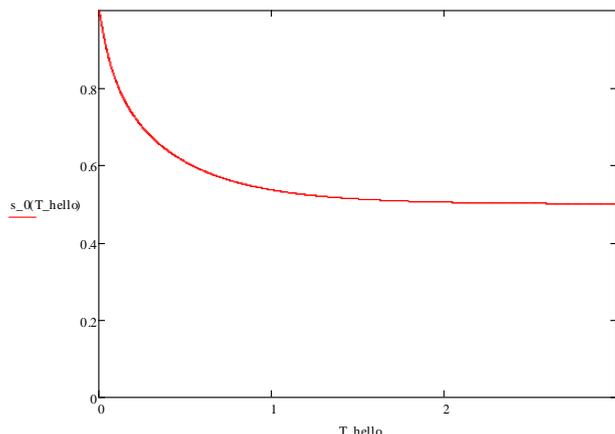
$T_{\text{hello}} := 0, 10^{-3} \dots 3$	$t_v := 0,25$
$t_o := 1$	$s_{\text{зад}} := 0,5$
$r := 5$	$T_{\text{ma}}(T_{\text{hello}}) := r \cdot T_{\text{hello}}$
$K_v := 0,9$	

Определение переходных вероятностей:

$$\begin{aligned}
 p_{00}(T_{hello}) &:= e^{-\frac{T_{hello}}{t_o}} & p_{20}(T_{hello}) &:= 1 - e^{-\frac{(T_{hello}+T_{ma}(T_{hello}))}{(t_o+t_v)}} \\
 p_{01}(T_{hello}) &:= 1 - e^{-\frac{T_{hello}}{t_o}} & p_{23}(T_{hello}) &:= e^{-\frac{(T_{hello}+T_{ma}(T_{hello}))}{(t_o+t_v)}} \\
 p_{10}(T_{hello}) &:= 1 - e^{-\frac{T_{hello}}{t_o+t_v}} & p_{33}(T_{kon}, m_b) &:= 1 - e^{-1} \\
 p_{12}(T_{hello}) &:= e^{-\frac{T_{hello}}{t_o+t_v}} & p_{30}(T_{kon}, m_b) &:= e^{-1}
 \end{aligned}$$

Выражение для коэффициента готовности:

$$s_0(T_{hello}) := \frac{p_{30}(T_{kon}, m_b)}{p_{01}(T_{hello})p_{30}(T_{kon}, m_b) + p_{30}(T_{kon}, m_b) + p_{01}(T_{hello})p_{12}(T_{hello})p_{23}(T_{hello}) + p_{01}(T_{hello})p_{30}(T_{kon}, m_b) - p_{12}(T_{hello})}$$



Функция для определения временных параметров методом Ньютона

$$s_{01}(T_{hello}) := K_{CTP}s_0(T_{hello}) - s_{zad}$$

Определение первой ( $p1(T_{hello})$ ) и второй ( $p2(T_{hello})$ ) производной от функции  $s_0(T_{hello})$  по  $T_{hello}$

$$\begin{aligned}
 p1(T_{hello}) &:= \frac{d}{dT_{hello}} s_{01}(T_{hello}) & p2(T_{hello}) &:= \frac{d^2}{dT_{hello}^2} s_{01}(T_{hello})
 \end{aligned}$$

Решение уравнения методом Ньютона:

Задание условий решения

$$A := 0$$

$$B := 10$$

$$\epsilon := 1 \times 10^{-5}$$

– порог поиска слева

– порог поиска справа

– точность определения

### Решение

$\text{casat2}(s_{01}, A, B, \varepsilon) := \left\{ \begin{array}{l} T\_hello\_1 \leftarrow A \text{ if } p1(A) \cdot p2(A) < 0 \\ T\_hello\_1 \leftarrow B \text{ otherwise} \\ \text{while } \left  \frac{s_{01}(T\_hello\_1)}{p1(T\_hello\_1)} \right  \geq \varepsilon \\ \left\{ \begin{array}{l} T\_hello\_2 \leftarrow T\_hello\_1 - \frac{s_{01}(T\_hello\_1)}{p1(T\_hello\_1)} \\ T\_hello\_1 \leftarrow T\_hello\_2 \end{array} \right. \\ T\_hello\_1 \end{array} \right.$	<p>– определение направления поиска;</p> <p>– условие продолжения поиска;</p> <p>– построение касательных;</p>
$\text{casat2}(s_{01}, A, B, \varepsilon) \rightarrow 0.01947009907450450079124267173'$	<p>– вывод результата расчетов.</p>

### Литература

1. Кузенков А. Состояние и перспективы развития отечественных ретрансляторов // *Аэрокосмический курьер*. 2013. № 2. С. 42-45.
2. Назаров А. Н., Симонов М. В. *АТМ: технология высокоскоростных сетей*. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1997. 232 с.
3. Новиков С. Н. *Методы маршрутизации на цифровых широкополосных сетях связи: Учебное пособие. Ч. 1*. Новосибирск: СибГУТИ, 2008. 84 с.
4. Новиков С. Н. *Методы маршрутизации на цифровых широкополосных сетях связи: Учебное пособие. Ч. 2*. Новосибирск: СибГУТИ, 2008. 59 с.
5. Пороцкий С. М. Моделирование алгоритма маршрутизации транспортной АТМ-сети // *Электросвязь*. 2000. № 10. С. 16-19.
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*. № 4. 2013. С. 69–79.
8. Глухов А. Д. О связной функции графа // *Исследование операций и АСУ*. 1990. № 36. С. 20-22.
9. Батурина Л. Н., Лепешинский Н. А. Алгоритмы оптимизации параметров, обеспечивающих заданный уровень живучести // *Вести АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. Том 12*. С. 26-29.
10. Полесский В. П. Структурная надежность однородных вероятностных сетей // *Управление сетями и синтез управляющих устройств*. М.: Наука, 1969. С. 16-20.
11. Птицын Г. А. Вероятностные модели гибели равнопрочных сетей // *T-Comm*. 2013. № 10. С. 85-88.
12. Птицын Г. А. Анализ строения деревьев кратчайших путей развивающихся сетей // *Электросвязь*. 1996. № 3. С. 4-6.
13. Попков В. К. *Математические модели связности*. 2-ое изд. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2006. 460 с.

14. Попков В. К., Блукке В. П., Дворкин А. Б. Модели анализа устойчивости и живучести информационных сетей // Проблемы информатики. 2009. № 4. С. 63–78.
15. 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.
16. Грызунов В. В. Оценивание живучести неоднородных структур // Вестник СибГУТИ. 2011. № 1. С. 28–36.
17. Егунов М. М., Шувалов В. П. Анализ структурной надежности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54–60.
18. Додонов А. Г., Ландэ Д. В. Живучесть информационных систем. К.: Наук. думка, 2011. 256 с.
19. Стельченко В. Ф., Шостак А. В. Приближенный метод синтеза топологической структуры k-связной сети передачи данных // Автоматика и вычислительная техника. 1989. № 6. С. 40–45.
20. Зеленцов В. А., Гагин А. А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи. М.: Министерство обороны СССР, 1991. 169 с.
21. Маршрутизация и защита информации на сетевом уровне в мультисервисных сетях связи / Буров А. А., Киселев А. А., Новиков С. Н., Сафонов Е. В., Солонская О. И., под ред. С. Н. Новикова. Новосибирск: ГОУ ВПО СибГУТИ, 2004. 221 с. Деп. в ВИНТИ 04.11.04, № 1732-B2004 // Депонированные научные работы, № 1, 2005.
22. Кораблин М. А., Хамитова Л. А. Матрично-графовые модели компьютерных сетей // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Том 6. № 3. С. 46–52.
23. Рудь Д. Е. Технологии топологической оптимизации трафика информационных потоков в телекоммуникационных сетях // Инженерный вестник Дона. 2010. Том 12. № 2. С. 95–107.
24. Милованов Д. С., Тухтамирзаев А. Ю., Шамин П. Ю. Проблемы маршрутизации в сети с быстро меняющейся топологией // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 72. С. 29–33.
25. Батаев Р. А., Голубев А. С. Вероятностный подход при создании алгоритмов маршрутизации в сетях с изменяющейся топологией // Тр. XIV Всерос. науч.–метод. конф. «Телематика 2007». 2007. Т. 1. 267 с.
26. Дмитриев В. Н., Сорокин А. А., Пищин О. Н. Построение систем связи с динамической непериодической топологией // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Том 6. № 1. С. 34–39.
27. Нижарадзе Т. З. Алгоритм многопутевой маршрутизации в сетях оптической коммутации блоков // Системы управления и информационные технологии. 2006. № 2.1(24). С. 167–170.
28. Нижарадзе Т. З. Разработка и исследование модели алгоритма динамической маршрутизации для сетей GMPLS. Дис. ... к.т.н. Вологда: Вологодский государственный технический университет, 2007. 161 с.

29. Макаренко С. И., Рюмшин К. Ю., Михайлов Р. Л. Модель функционирования объекта сети связи в условиях ограниченной надежности каналов связи // Информационные системы и технологии. 2014. № 6 (86). С. 139-147.
30. 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.
31. 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 доступа 01.03.2015).
32. Новиков С. Н. Классификация методов маршрутизации в мультисервисных сетях связи // Вестник СибГУТИ. 2013. № 1. С. 57-67.
33. Миновичкин А. И., Романюк В. А. Маршрутизация в мобильных радиосетях: проблема и пути ее решения // Зв'язок. 2006. № 7. С. 49-55.
34. Программа сетевой академии Cisco CCNA 3 и 4. Вспомогательное руководство. М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. 1168 с.
35. Ушаков И. А. Курс теории надежности систем: учеб. пособие для вузов. М.: Дрофа, 2008. 239 с.
36. 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.
37. Фокин В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие. М.: Эко-Трендз, 2008. 271 с.
38. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. П. Вычислительные методы для инженеров. М.: Высшая школа, 1994. 544 с.
39. Громов Ю. Ю., Долгов А. А., Хорохорин М. А., Минин Ю. В. Использование теории возможностей при оценке живучести сетевых информационных структур // Информация и безопасность. 2014. Том 17. № 1. С. 62-67.
40. Елисеев А. И., Минин Ю. В. Графовая модель получения значений показателей частных характеристик сетевых информационных структур // Вестник Воронежского государственного университета. 2013. Том 9. № 1. С. 22-25.
41. Корячко В. П., Перепелкин Д. А. Анализ и проектирование маршрутов передачи в корпоративных сетях. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 236 с.

## References

1. Kuzenkov A. Sostoianie i perspektivy razvitiia otechestvennykh retransliatorov [The State and Prospects of Development of Domestic Repeaters]. *Aerospace courier*, 2013, vol. 2, pp. 42-45 (in Russian).
2. Nazarov A. N., Simonov M. V. *ATM: tekhnologiiia vysokoskorostnykh setei* [ATM: the Technology of High-Speed Networks]. Moscow, EKO-TRENDZ Publ., 1997, 232 p. (in Russian).

3. Novikov S. N. *Metody marshrutizatsii na tsifrovyykh shirokopolosnykh setiakh svyazi. Chast' 1.* [Routing Methods in Integrated Services Digital Network. Part 1]. Novosibirsk, Siberian State University for Telecommunication and Information Sciences, 2008, 84 p. (in Russia).

4. Novikov S. N. *Metody marshrutizatsii na tsifrovyykh shirokopolosnykh setiakh svyazi. Chast' 2.* [Routing Methods in Integrated Services Digital Network. Part 2]. Novosibirsk, Siberian State University for Telecommunication and Information Sciences, 2008, 59 p. (in Russia).

5. Porotskii S. M. Modelirovanie algoritma marshrutizatsii transportnoi ATM-seti [Modeling Routing Algorithm for ATM Transport Network]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2000, vol. 10, pp. 16-19 (In Russia).

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. Otsenka ustoichivosti seti svyazi v usloviakh vozdeistviya na nee destabiliziruiushchikh faktorov [Estimating Communication Network Stability under the Conditions of Destabilizing Factors Affecting it]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*, 2013, no. 4, pp. 69–79 (in Russian).

8. Glukhov A. D. O svyaznoi funktsii grafa [Function Graph Connectivity]. *Issledovanie operatsii i ASU*, 1990, vol. 36, pp. 20-22 (in Russian).

9. Baturina L. N., Lepeshinskii N. A. Algoritmy optimizatsii parametrov, obespechivaiushchikh zadannyi uroven' zhivuchesti [Optimization Algorithms Parameters to Provide the Desired Level of Survivability]. *Akademiia Nauk Belorusskoi Respubliki, Seriya fiz.-mat. nauk*, 1983, vol. 4, pp. 26-29 (In Russian).

10. Poleskii V. P. Strukturnaia nadezhnost' odnorodnykh veroiatnostnykh setei [Structural Reliability of Homogeneous Probabilistic Networks]. *Upravlenie setiami i sintez upravliaiushchikh ustroystv*, Moscow, Nauka Publ., 1969, pp. 16-20 (in Russian).

11. Ptitsyn G. A. Veroiatnostnye modeli gibeli ravnoprochnykh setei [Probabilistic Models of the Death of Full-Strength Networks]. *T-Comm*, 2013, vol. 10, pp. 85-88 (in Russian).

12. Ptitsyn G. A. Analiz stroeniia derev'ev kratchaishikh putei razvivaiushchikhsia setei [Analysis of the Structure of the Tree of Shortest Paths for Developing Networks]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 1996, no. 3, pp. 4-6 (in Russian).

13. Popkov V. K. *Matematicheskie modeli svyaznosti* [Mathematical Models of Connectivity]. Novosibirsk, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, 460 p. (in Russian)

14. Popkov V. K., Blukke V. P., Dvorkin A. B. Modeli analiza ustoichivosti i zhivuchesti informatsionnykh setei [Models for Analysis of Stability and Reliability of Telecommunication Networks]. *Problemy informatiki*, 2009, no. 4, pp. 63–78 (in Russian).

15. Gromov Ju. Ju., Drachev V. O., Nabatov K. A., Ivanova O. G. *Sintez i analiz zhivuchesti setevykh sistem: monografija* [Synthesis and Analysis Net Systems Reliability]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007, 152 p. (in Russian).
16. Gryzunov V. V. Otsenivanie zhivuchesti neodnorodnykh struktur [The Estimation of Nonuniform Structures` Reliability]. *Vestnik SibGUTY*, 2011, no. 1, pp. 28–36 (in Russian).
17. 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).
18. Dadonov A. G., Lande D. V. *Zhivuchest' informatsionnykh sistem* [Survivability of the Information Systems]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2011. 256 p. (in Russian).
19. Stel'chenok V. F., Shostak A. V. Priblizhennyi metod sinteza topologicheskoi struktury k-sviaznoi seti peredachi dannykh [Approximate Method for the Synthesis of Topological Structure for K-connected Data Network]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 1989, no. 6, pp. 40-45 (in Russian).
20. Zelencov V. A. Gagin A. A. *Nadezhnost', zhivuchest' i tekhnicheskoe obsluzhivanie setei svyazi* [Reliability, Survivability and Maintenance of Communication Networks]. Moscow, Ministry of Defense of the USSR Publ., 1991, 169 p. (in Russian).
21. Burov A. A., Kiselev A. A., Novikov S. N., Safonov E. V., Solonskaja O. I. *Marshrutizatsiia i zashchita informatsii na setevom urovne v mul'tiservisnykh setiakh svyazi* [Routing and Data Protection at the Net Level of Multiservice Communication Networks]. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunication and Information Sciences Publ., 2004. 221 p. (in Russian).
22. Korablin M. A., Hamitova L. A. Matrichno-grafovye modeli komp'yuternykh setei [Array and Graph Models of Computer Networks]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2008, vol. 6, no. 3, pp. 46–52 (in Russian).
23. Rud' D. E. Tekhnologii topologicheskoi optimizatsii trafika informatsionnykh potokov v telekommunikatsionnykh setiakh [Technologies of Topological Optimization of Information Traffic in Telecommunication Networks]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2010, vol. 12, no. 2, pp. 95–107 (in Russian).
24. Milovanov D. S., Tuhtamirzaev A. Ju., Shamin P. Ju. Problemy marshrutizatsii v seti s bystro meniaiushcheisia topologiei [Problems of Routing in Fast Variable Topology Networks]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPBGPU*, 2009, no. 72, pp. 29–33 (in Russian).
25. Bataev R. A., Golubev A. S. Veroiatnostnyi podkhod pri sozdanii algoritmov marshrutizatsii v setiakh s izmeniaiushcheisia topologiei [The Probabilistic Way of Creating the Routing Algorithms in Fast Variable Topology Networks]. *Tr. XIV Vseros. nauch.–metod. konf. «Telematika 2007»* (Proc. XIV. Science-methodical Conf. “Telematika 2007”), 2007, vol. 1, pp. 267 (in Russian).
26. Dmitriev V. N., Sorokin A. A., Pishhin O. N. Postroenie sistem svyazi s dinamicheskoi neperiodicheskoi topologiei [Non-periodic Dynamic Topology Communication Systems` Creating]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2008, vol. 6, no. 1, pp 34–39 (in Russian).

27. Nizharadze T. Z. Algoritm mnogoputevoi marshrutizatsii v setiakh opticheskoi kommutatsii blokov [The Algorithm of Multipath Routing in Optical Networks Switching Blocks]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2006, pp. 167-170 (in Russian).

28. Nizharadze T. Z. *Razrabotka i issledovanie modeli algoritma dinamicheskoi marshrutizatsii dlia setei GMPL*. Diss. kand. tehn. nauk [The Model of Dynamic Routing Algorithm for GMPLS Networks, Research and Development Ph.D. Tesis]

29. Makarenko S. I., Ryimshin K. Yu., Mixajlov R. L. Model' funktsionirovaniia ob"ekta seti sviazi v usloviakh ogranichennoi nadezhnosti kanalov sviazi [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).

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

31. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. Issledovanie kanal'nykh i setevykh parametrov kanala sviazi v usloviakh dinamicheskoi 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 3 March 2014) (in Russian).

32. Novikov S. N. Klassifikatsiia metodov marshrutizatsii v mul'tiservisnykh setiakh sviazi [Classification of Routing Methods in Multiservice Networks]. *Vestnik SibGUTI*, 2013, no. 1, pp. 57-67 (In Russia).

33. Minochkin A. I., Romaniuk V. A. Marshrutizatsiia v mobil'nykh radiosetiakh: problema i puti ee resheniia [Routing in Mobile Radio Networks: the Problem and Its Solution]. *Zv'iazok Publ.*, 2006, vol. 7, pp. 49-55 (In Russia).

34. *Cisco Networking Academy Program CCNA 3 and 4. Companion Guide*. Cisco Press Publ., 2007. 1168 p.

35. Ushakov I. A. *Kurs teorii nadezhnosti sistem* [The Theory of Reliability of Systems], Moscow, Drofav Publ., 2008, 239 p. (in Russian).

36. Tsvetsov 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*, vol. 69, no. 2, 2014, pp. 71-78 (in Russian).

37. 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).

38. Amosov A. A., Dubinskii Iu. A., Kopchenova N. P. *Vychislitel'nye metody dlia inzhenerov* [Computational Approach for Engineers]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1994, 544 p. (in Russian).

39. Gromov Yu. Yu., Dolgov A. A., Horohorin M. A., Minin Yu. V. Use of the Theory of Possibilities when Determining the Reliability of Network Information Structures. *Informatsiia i bezopasnost'*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 62-67 (in Russian).

40. Eliseev A. I., Minin Yu. V. Grafovaia model' polucheniia znachenii pokazatelei chastnykh kharakteristik setevykh informatsionnykh struktur [Graph Model of Obtaining Values of Indicators of Private Characteristics of Network Information Structures]. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 22-25 (in Russian).

41. Korjachko V. P., Perepelkin D. A. *Analiz i proektirovanie marshrutov peredachi v korporativnykh setiah* [The Analysis and Designing of Routes at Transmission in Corporate Networks]. Moscow, Goriachaia Liniia - Telecom Publ., 2012, 236 p. (in Russian).

Статья поступила 6 марта 2015 г.

### Информация об авторах

*Макаренко Сергей Иванович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. Тел.: +7 981 820 49 90. E-mail: mak-serg@yandex.ru

*Михайлов Роман Леонидович* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям; радиомониторинг. Тел.: +7 911 777 69 73. E-mail: mikhailov-rom2012@yandex.ru

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

---

## Signaling with Adaptation Parameters in Routing Protocol with a Connection on Influence of Destabilizing Factors

**Makarenko S. I., Mikhailov R. L.**

**Statement of the problem.** The structural complexity of communication network is growing up, and questions of stability to influences of destabilizing factors are current importance. Known methods of increasing the stability of the communication lines, based on the routing data flows on the primary and several backup paths, and do not take into account the loss of time on the processes of reconfiguring connections. Purpose of ensuring a certain level of stability in terms of the availability of the connection taking into account its structure and by adapting temporal parameters diagnostics of the health of the connection The paper offered to consider at stability maintenance not only connection structure, but also time expenses for communication restoration. In paper show, that these time expenses are defined by time parameters of refusals of elements of connections and the period of diagnostics of working capacity of elements. A predetermined level of stability will provide by adaptive change of the period of diagnosis of the operability of the connection in accordance with the measured average time of failure network element.

**Methods:** The solution of the problem based on the use of methods of reliability theory and the theory of Markov processes. The criterion of achieving a given level of stability of the connection is the value of the coefficient of readiness of the compound based on its structure and processes to its reconfiguration. **Innovation:** consideration of the impact of destructive factors through the transitional probabilities of the original Markov model are the elements of novelty of the presented solutions. Also for the first time used the approach to assess the availability of the connection is based on further evaluation of the processes of reconfiguring a connection. **Results:** The decision on the adaptation of the parameters in the routing Protocol with the establishment of connections allows to provide a set level of stability (in terms of the availability of the connection) failure of the individual elements due to the impact of destabilizing factors. **Practical implications:** presented solution is implemented in a mathematical software routing protocols connection: Hello, PNNI, MPLS functioning in networks exposed to destabilizing factors. This will allow for adaptive dynamic change of parameters in the diagnosis of the state of the connection (end-to-end) depending on the level of influence of destabilizing factors on the network elements

**Key words:** connection, clustering, routing, communication protocol, destabilizing factor, intentional interference, PNNI, MPLS.

### Information about Authors

*Makarenko Sergey Ivanovich* – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. Тел.: +7 981 820 49 90. E-mail: mak-serg@yandex.ru

*Mikhailov Roman Leonidovich* – doctoral candidate. The postgraduate student of the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; radiomonitoring. Тел.: +7 911 777 69 73. E-mail: mikhailov-rom2012@yandex.ru

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