

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТИ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

*Сергей Николаевич Новиков*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, e-mail: snovikov@ngs.ru

При анализе методов маршрутизации на сетях связи произвольной структуры, имеющих несколько десятков узлов коммутации, возникают проблемы, связанные с решением задач большой размерности. В данной статье предлагаются подходы, позволяющие проводить анализ методов маршрутизации с целью выявления тех методов маршрутизации, которые будут наиболее эффективно функционировать в предполагаемых сетях связи и в заданных условиях.

**Ключевые слова:** план распределения информации, метод маршрутизации, внешние деструктивные воздействия.

## **MODELING OF THE PERFORMANCE OF NETWORK COMMUNICATION IN TERMS OF EXTERNAL DESTRUCTIVE INFLUENCES**

*Sergei N. Novikov*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Associate Professor, Department of Information Security, e-mail: snovikov@ngs.ru

When analyzing routing methods on communication networks of arbitrary structure that have several dozen switching nodes, problems arise related to solving large-scale problems. This article proposes an approach that allows analysis of routing methods to identify those routing methods that will most effectively function in the intended communication networks and in specified conditions.

**Key words:** Information distribution plan, routing method, external destructive effects.

### *Введение*

Спектр методов маршрутизации, которые можно применить на сетях связи, весьма широк – от простейших, фиксированных процедур, до весьма сложных. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. В работе [0] предложена классификация методов маршрутизации для сетей связи, учитывающая независимые процедуры: формирование плана распределения информации (ПРИ) на сети (протоколы маршрутизации); выбор исходящих линий, трактов, каналов связи в узлах коммутации (УК) (протоколы сигнализации). Данная классификация позволяет:

– выявить множество вариантов реализации как последовательных, так и параллельных (многопутевых) методов маршрутизации (например: "Детерми-

нированный диффузный последовательный с использованием лавинного метода формирования ПРИ» [0] – RIP, OSPF, BGP, PNNI и др.);

– провести целенаправленный анализ и синтез тех методов маршрутизации, которые будут наиболее эффективно функционировать в предполагаемых сетях связи и в заданных условиях.

Выбор метода маршрутизации в значительной мере влияет на эффективность использования ресурсов сети и качество обслуживания приложений, доступных пользователям. Вместе с тем проведение натурных исследований на действующих сетях сопряжено с существенными техническими, организационными и финансовыми трудностями. Поэтому в качестве инструментария для анализа влияния маршрутизации на QoS приложений сети связи применяют имитационное и математическое моделирование.

К настоящему времени в качестве математического аппарата используют теорию графов, массового обслуживания, цепей Маркова, нечетких множеств, нейронных сетей, игр, сетей Петри и др. Применение столь широкого диапазона математических подходов обусловлено сложностью и спецификой предмета анализа [2]. Особенно усложняется задача исследования методов маршрутизации на сетях связи больших размерностей и в условиях внешних деструктивных воздействий на ее элементы.

В данной статье предлагаются подходы моделирования методов маршрутизации на сети связи большой размерности, функционирующей в условиях внешних деструктивных воздействий.

### ***Методика определения плана распределения информации на однородной ячеистой сети связи большой размерности***

В тех случаях, когда структура сети связи приобретает некоторую регулярность, что характерно для ячеистых сетей связи, представляется возможным представить ее в виде регулярной правильной решетки. Результаты, полученные на таких структурах, могут дать асимптотические оценки для анализа методов маршрутизации и значительно уменьшить сложность алгоритмов, моделирующих эти методы.

Выберем для анализа методов маршрутизации ячеистую однородную структуру сети связи с квадратной ячейкой.

Вложим граф  $G[A_S, M_S]$  ( $A_S = \{a_i\}; i = \overline{1, S}$  - множество вершин, соответствующих УК;  $M_S = \{m_{ij}\}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j$  - , ребера, соответствующие линиям связи (ЛС)), описывающий структуру сети, в прямоугольную систему координат так, чтобы координаты вершин графа принимали только положительные целые числа с шагом, равным единице. Тогда каждая вершина  $a_i; i = \overline{1, S}$  будет иметь свой адрес с координатами  $\{i, j\}$ .

Исходную вершину графа, соответствующую узлу-источнику (УИ) анализируемой сети связи, поместим в начало координат. Далее будем рассматривать процедуру нахождения маршрута между любой вершиной графа  $G[A_S, M_S]$ , соответствующую узлу-получателю (УП), и исходной (УИ).

Пусть  $\beta_{ij}$  определяет число кратчайших (по числу промежуточных вершин) маршрутов между УИ с координатами  $\{0,0\}$  и вершиной  $\{i, j\}; i = 1, x_{\max}; j = 1, y_{\max}$ , где  $x_{\max}$  и  $y_{\max}$  – максимальные количества УК по осям  $X$  и  $Y$  соответственно.

Величину  $\beta_{ij}$  будем присваивать вершине с координатами  $\{i, j\}$ , имея при этом в виду, что она относится к паре УК с координатами  $\{0,0\}$  (УИ),  $\{i, j\}$  (УП). Очевидно, что для однородной ячеистой сети связи с квадратной ячейкой величины  $\beta_{ij}$  и  $\beta_{ji}$  равны между собой. Все вершины графа  $G[A_S, M_S]$  по отношению к вершине  $\{i, j\}$  будем разделять на два подмножества  $A_1$  и  $A_2$ .

В подмножество  $A_1$  входят те узлы, которые не выходят за пределы установленного прямоугольника анализируемой сети связи, ограниченного вершинами с координатами:  $\{i, j\}; \{i,0\}; \{0,0\}$  и  $\{0, j\}$  (рис. 1).

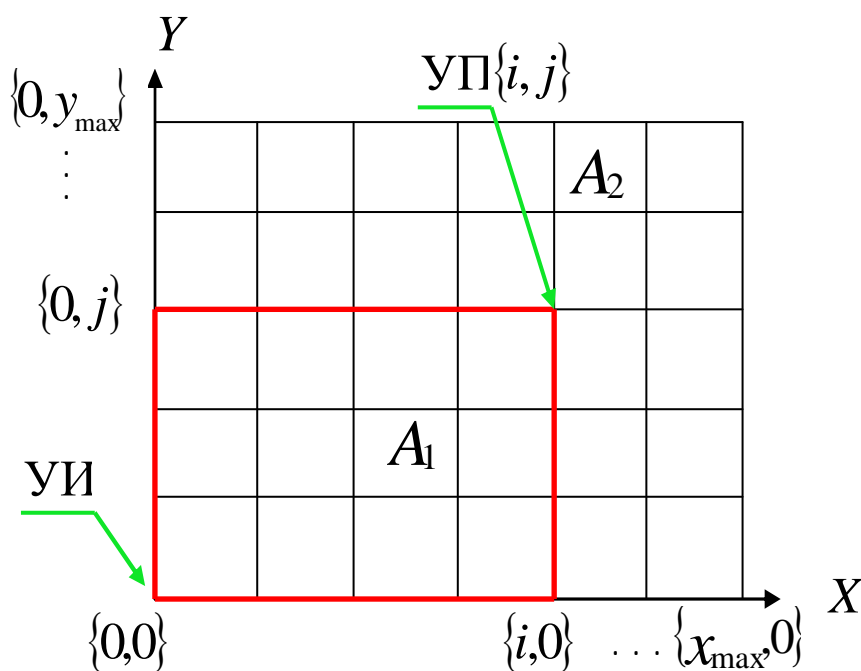


Рис. 1. Определение числа кратчайших маршрутов между УИ и УП

Справедливо следующее утверждение: число кратчайших маршрутов  $\beta_{ij}$  между УИ с координатами  $\{0,0\}$  и вершиной с координатами  $\{i, j\}$  (УП) определяется только вершинами, входящими в подмножество  $A_1$ .

Отдельно изобразим подмножество  $A_1$  с учетом  $\beta_{ij}$  (рисунок 2). В результате получим перевернутый треугольник Паскаля с вершиной в начале прямоугольной системы координат. Биноминальные коэффициенты треугольника Паскаля будут соответствовать количеству кратчайших маршрутов между УИ и УП.

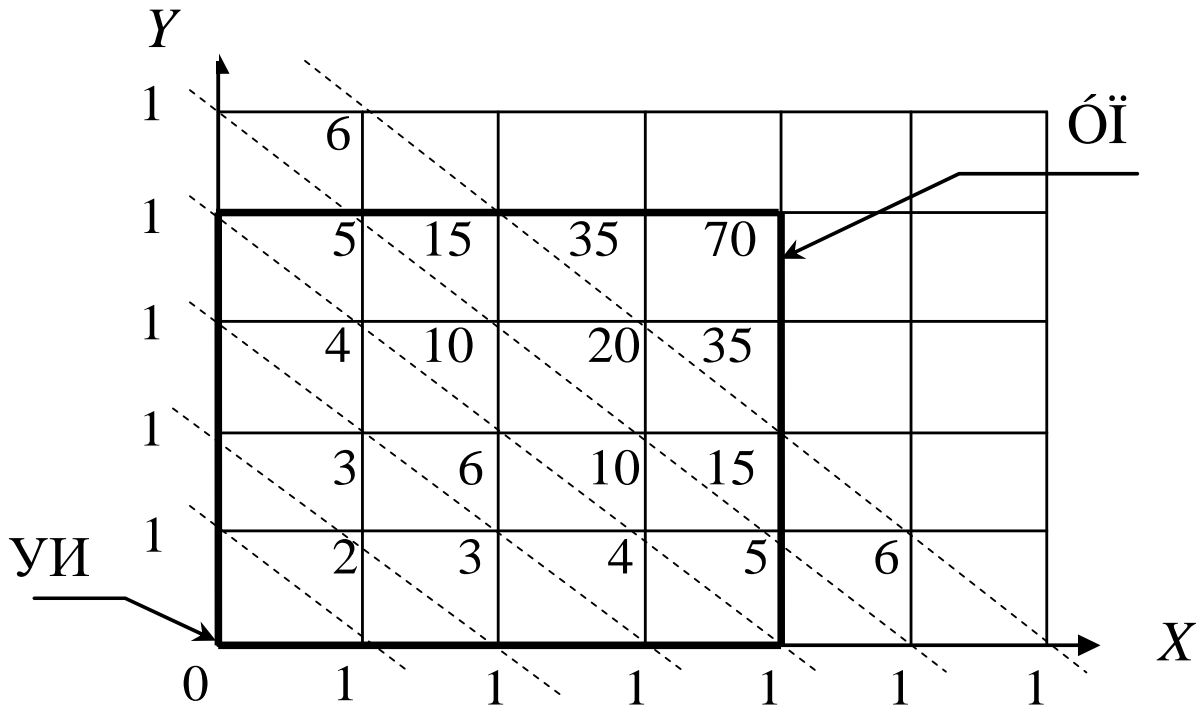


Рис. 2. Представление анализируемой сети в виде треугольника Паскаля

Учитывая это положение, несложно получить формулу, определяющую:

$$\beta_{ij} = \frac{(i+j)!}{i! \cdot j!}.$$

Для определения самих маршрутов необходимо вычислить величины:

$$p_{ij}^x = \frac{\beta_{i-1,j}}{\beta_{i,j}} \text{ и } p_{ij}^y = \frac{\beta_{i,j-1}}{\beta_{i,j}},$$

где  $\{i-1, j\}$  и  $\{i, j-1\}$  – координаты смежных узлов в подмножестве  $A_1$ .

Очевидно, что

$$p_{ij}^x + p_{ij}^y = 1.$$

Подставив в формулы, определяющие  $p_{ij}^x$  и  $p_{ij}^y$ , значение

$$\beta_{ij} = \frac{(i+j)!}{i! \cdot j!},$$

получим:

$$p_x = p_{ij}^x = \frac{i}{i+j}; \quad p_y = p_{ij}^y = \frac{j}{i+j}. \quad (1)$$

Таким образом, для выбора более предпочтительного направления в УК по числу кратчайших маршрутов из данного УК, достаточно сопоставить между собой координаты этого узла и продолжить поиск маршрута по направлению координаты  $X$  или  $Y$ , имеющей большее значение,  $p_x$  или  $p_y$  соответственно.

Следовательно, используя простые расчеты в каждом УК, можно последовательно строить маршрут от УИ к УП. Причем величины  $p_x$  и  $p_y$  представлены в форме, удобной для применения в алгоритме маршрутизации как с детерминированным, так и со стохастическим выбором направления в УК.

Если в алгоритме маршрутизации помимо  $p_x$  и  $p_y$  учитывать и другие параметры трактапередачи информации (ТПС) (вероятностно-временные характеристики, определяющие QoS приложений сети связи) в направлении  $X$  и  $Y$  соответственно,  $\Omega_{ij}^x$  и  $\Omega_{ij}^y$ , исходящих из узла  $\{i, j\}$ , то тогда коэффициенты, определяющие предпочтительность выбора направления, могут быть получены из следующих выражений:

$$\begin{cases} n_x = \frac{p_x \cdot q_x}{p_x \cdot q_x + p_y \cdot q_y}; \\ n_y = \frac{p_y \cdot q_y}{p_x \cdot q_x + p_y \cdot q_y}, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\begin{cases} q_x = \frac{\Omega_x}{\Omega_x + \Omega_y}; \\ q_y = \frac{\Omega_y}{\Omega_x + \Omega_y}. \end{cases} \quad (3)$$

Приведем методику формирования ПРИ на сети для некоторых методов маршрутизации, наиболее характерных для каждой группы [0].

**«Градиентный вероятностно-детерминированный последовательный с логическим методом формирования плана распределения информации»** предусматривает установление маршрутов между парой УИ и УП с минимальным количеством транзитных УК. В случае отсутствия маршрутов с минимальным количеством транзитных УК заявка, поступившая на обслуживание от пользователя УИ, получает отказ. Выбор ТПС в каждом УК

осуществляется детерминировано в соответствии с коэффициентами, рассчитанными по формуле (1). Однако в случае  $p_x = p_y$  выбор исходящего ТПС осуществляется вероятностно.

Пусть  $\{i, j\}$  – координаты УИ;  $\{i', j'\}$  – координаты УП ( $i, i' = \overline{1, x_{\max}}; j, j' = \overline{1, y_{\max}}$ ). Тогда величины

$$D_x = i' - i \text{ и } D_y = j' - j$$

определяют количество транзитных УК от УИ до УП по осям  $X$  и  $Y$  соответственно. Причем знаки у  $D_x$  и  $D_y$  указывают геометрическое расположение УП относительно УИ (рис. 3). Покажем это следующим образом:

$$\begin{cases} \text{если } D_x > 0, & \text{то 2-е направление;} \\ \text{если } D_x < 0, & \text{то 4-е направление;} \\ \text{если } D_y > 0, & \text{то 1-е направление;} \\ \text{если } D_y < 0, & \text{то 3-е направление.} \end{cases} \quad (4)$$

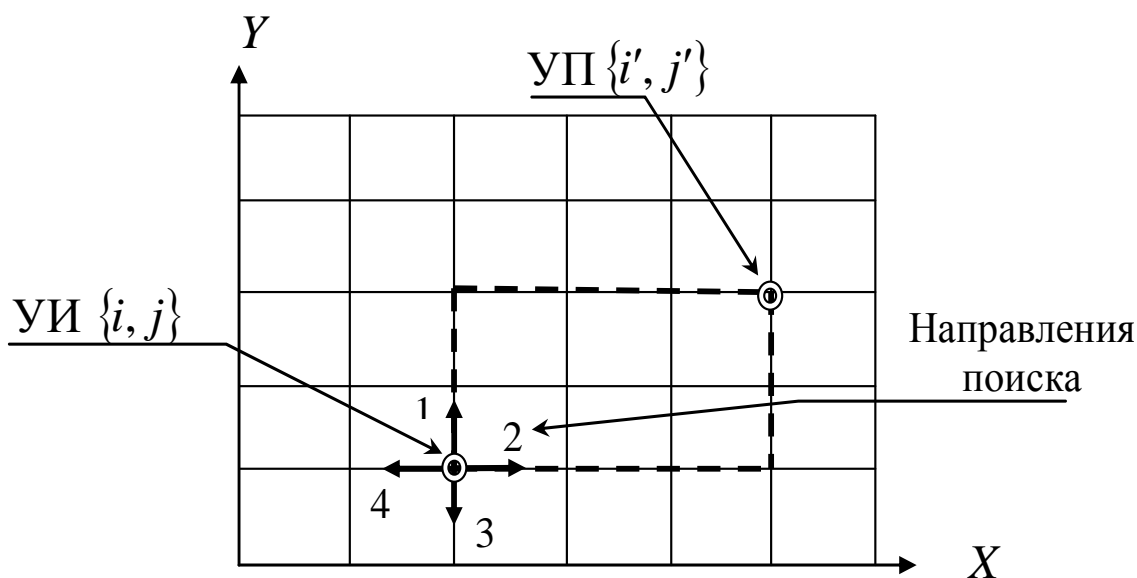


Рис. 3. Определение направлений между УИ и УП

В этом случае алгоритм маршрутизации состоит в вычислении в каждом транзитном УК, начиная с УИ, выражений:

$$\left. \begin{array}{l} D_x = i' - i; \\ D_y = j' - j; \\ P_x = \frac{|D_x|}{|D_x| + |D_y|}; \\ P_y = \frac{|D_y|}{|D_x| + |D_y|}. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Сравнивая коэффициенты  $P_x$  и  $P_y$  между собой по алгоритму:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{если } P_x > P_y, & \text{то продолжение поиска по оси } X; \\ \text{если } P_x < P_y, & \text{то продолжение поиска по оси } Y; \\ \text{если } P_x = P_y, & \text{то выбор поиска осуществляется} \\ & \text{вероятностно,} \end{array} \right. \quad (6)$$

принимается решение о продолжении поиска маршрута между УИ и УП. Затем, определив знак у  $D_x$ , если сделан выбор по оси  $X$ , или у  $D_y$ , если сделан выбор по оси  $Y$ , определяется одно из четырех направлений (4) (рис. 3), которое считается предпочтительным. Если вычисленное направление доступно, то оно подключается к ранее набранному маршруту. В случае не доступности определяется менее предпочтительное направление. Если и данном случае ТПС не доступен, то поиск маршрута прерывается и заявке, поступившей на обслуживание от УИ, дается отказ.

На рис. 4, *а* приведен пример установления соединения между УИ и УП с координатами, соответственно  $\{2,2\}$  и  $\{6,5\}$ . На рис. 3, *б* показана попытка организации маршрута между узлами с координатами  $\{7,2\}$  и  $\{2,4\}$ .

УК, вышедшие из строя, не дают возможности установить маршрут с минимальным числом ТУ между УИ и УП (хотя кратчайший маршрут существует), поэтому заявка, поступившая от пользователя УИ, получает отказ в обслуживании.

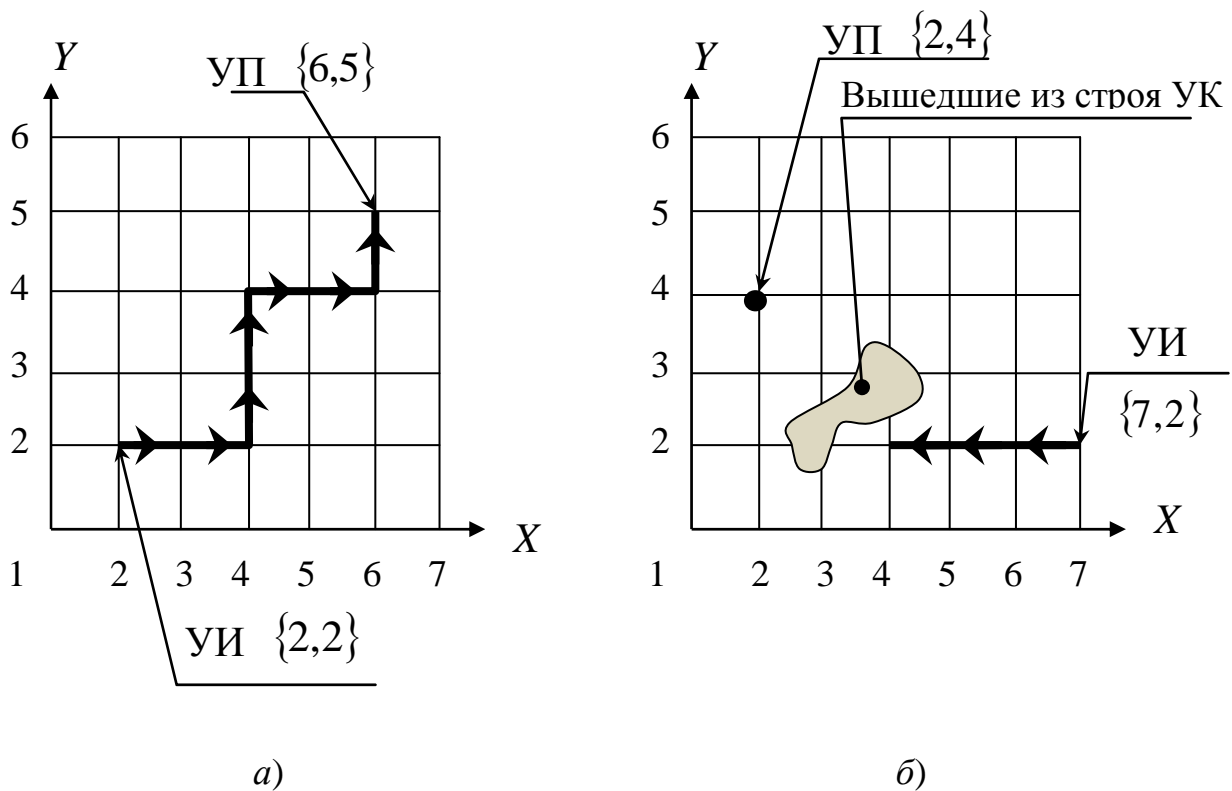


Рис. 4. «Градиентный вероятностно-детерминированный последовательный с логическим методом формирования плана распределения информации» метод маршрутизации

Для поддержания параметров QoS приложений необходимо учитывать вероятностно-временные параметры ТПС (пропускная способность, скорость передачи пакетов, время задержки, временной джиттер, вероятность ошибочного приема на символ, пакет и т.д.), участвующих в формировании маршрутов между УИ и УП. В этой связи при расчетах коэффициентов, определяющих предпочтительность выбора исходящих ТПС в каждом УК, необходимо воспользоваться формулами (2) и (3).

Если один из коэффициентов ( $n_x$  или  $n_y$ ) больше, то выбор исходящего ТПС в УК выполняется детерминировано. В случае равенства  $n_x$  и  $n_y$  между собой то выбор исходящего ТПС осуществляется вероятностно. Если не существует возможности установления маршрута с минимальным числом транзитных УК между УИ и УП, то заявка, поступившая от пользователя в УИ, получает отказ в обслуживании. Таким образом, в данном случае необходимо последовательно вычислять в каждом УК, начиная с УИ, значения:



$$\left\{ \begin{array}{l} D_x = i' - j; \\ D_y = j' - j; \\ P_x = \frac{|D_x|}{|D_x| + |D_y|}; \\ P_y = \frac{|D_y|}{|D_x| + |D_y|}; \\ q_x = \frac{\Omega_{ij}^x}{\Omega_{ij}^x + \Omega_{ij}^y}; \\ q_y = \frac{\Omega_{ij}^y}{\Omega_{ij}^x + \Omega_{ij}^y}; \\ n_x = \frac{P_x \cdot q_x}{P_x \cdot q_x + P_y \cdot q_y}; \\ n_y = \frac{P_y \cdot q_y}{P_x \cdot q_x + P_y \cdot q_y}, \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $\{i, j\}$  – координаты УИ;  $\{i', j'\}$ ;  $(i, i' = \overline{1, x_{\max}}; j, j' = \overline{1, y_{\max}})$  – координаты УП;  $\Omega_{ij}^x$  и  $\Omega_{ij}^y$  – параметры ТПС (вероятностно-временные характеристики, определяющие QoS приложений мультисервисной сети связи) в направлении оси  $X$  и оси  $Y$  соответственно.

Затем, сравнивая  $n_x$  и  $n_y$  между собой по алгоритму:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{если } n_x > n_y, & \text{то продолжение поиска по оси } X; \\ \text{если } n_x < n_y, & \text{то продолжение поиска по оси } Y; \\ \text{если } n_x = n_y, & \text{то выбор поиска осуществляется} \\ & \text{вероятностно,} \end{array} \right.$$

принимается решение о предпочтительности выбора направления (по оси  $X$  или по  $Y$ ) поиска маршрута.

Знак у  $D_x$ , если сделан выбор по оси  $X$ , или у  $D_y$ , если сделан выбор по оси  $Y$ , определяет (4) одно из четырех направлений, которое считается предпочтительным в сравнении с остальными по числу кратчайших маршрутов и по ВВХ трактов передачи сообщений между УИ и УП. Если вычисленное направление доступно, то оно подключается к ранее набранному маршруту. В случае недоступности ТПС вычисляется второе, менее предпочтительное. Если в данном случае ТПС не доступен, то данной заявке дается отказ в обслуживании.

**«Диффузный без возвращения назад вероятностно-детерминированный последовательный с логическим методом формирования плана распределения информации»** метод маршрутизации позволяет организовать маршрут между УИ и УП с неограниченным числом транзитных УК. Однако максимальное число выбора исходящих ТПС в УК не превышает трех. Маршрут от УИ к УП ищется по всем направлениям кроме тех, которые: ведут в противоположную сторону от УП; при данном поиске ранее были пройдены.

Таким образом, процедура поиска маршрута данным методом состоит в последовательном выполнении операций во всех транзитных УК, начиная с УИ, по правилам (4), (5) и (6).

Если вычисленное направление доступно, то соответствующий исходящий ТПС подключается к ранее выбранному маршруту. В противном случае вычисляется второе по предпочтительности направление. При необходимости определяется и третье. Если и в последнем случае исходящий ТПС недоступен, то данной заявке дается отказ в обслуживании. Вычисленные направления не должны прокладывать маршрут в противоположную сторону от УП и участвовать при данном поиске маршрута более одного раза.

На рис. 5, а приведен пример установления маршрута данным методом между УИ и УП с координатами  $\{2,5\}$  и  $\{6,3\}$  соответственно.

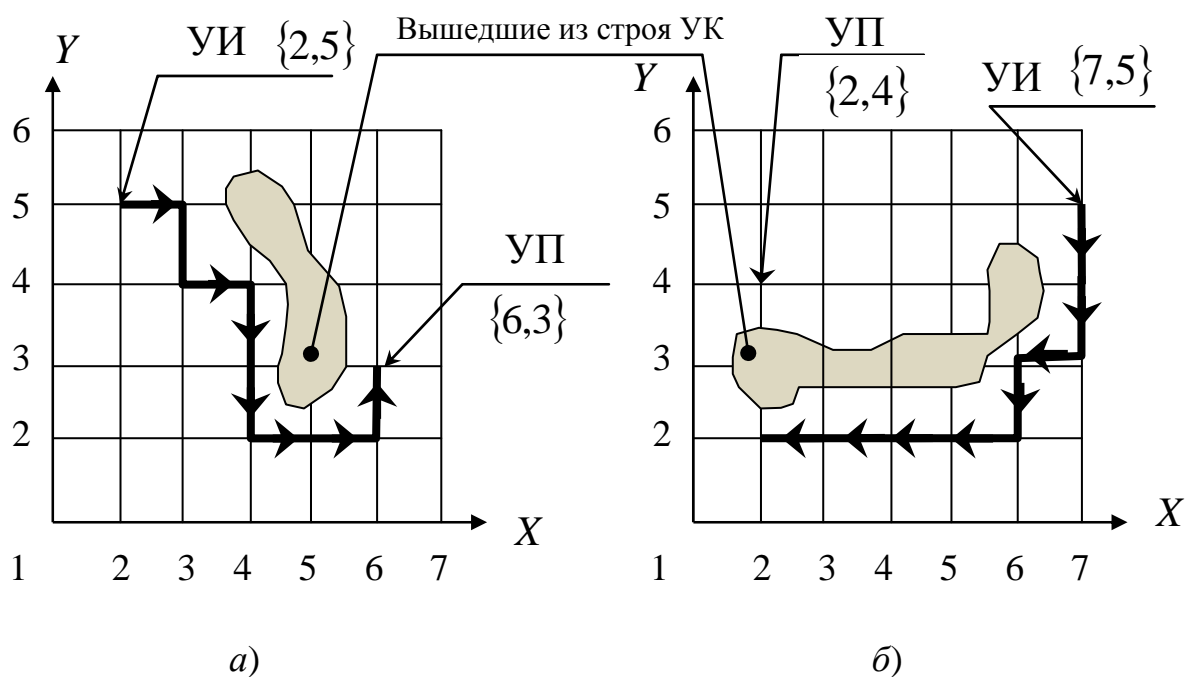


Рис. 5. «Диффузный без возвращения назад вероятностно-детерминированный последовательный с логическим методом формирования плана распределения информации» метод маршрутизации

На рис. 4, б показана попытка организации маршрута между узлами с координатами  $\{7,5\}$  и  $\{2,4\}$ . УК, вышедшие из строя, не дают возможности установить маршрут, в результате чего заявка, поступившая от пользователя УИ, получает отказ в обслуживании.

Формулы расчета вероятностей перехода по трем направлениям будут иметь вид:

$$P_1 = \frac{L+1}{3 \cdot L+2}; P_2 = \frac{L+1}{3 \cdot L+2}; P_3 = \frac{L}{3 \cdot L+2},$$

где  $L = |D_x| + |D_y|$ ;  $P_1, P_2$  и  $P_3$  – вероятности перехода по первому, второму и третьему направлениям поиска маршрута соответственно.

**«Диффузный вероятностно-детерминированный последовательный с логическим методом формирования плана распределения информации»** метод маршрутизации позволяет организовать маршрут между УИ и УП с неограниченным числом транзитных УК. Последовательно выполняя операции (4), (5) и (6) вычисляется наиболее предпочтительное направление (одно из четырех) по числу кратчайших маршрутов. Если выбранное направление доступно, то оно подключается к ранее набранному маршруту. В противном случае вычисляется новое, менее предпочтительное направление. Данная процедура повторяется до тех пор, пока не найдется доступный, исходящий ТПС. Если же доступные, исходящие ТПС во всех направлениях отсутствуют, то заявке, поступившей от пользователя УИ, дается отказ в обслуживании.

На рис. 6 приведен пример организации маршрута между УИ и УП с координатами  $\{3,3\}$  и  $\{6,2\}$  соответственно.

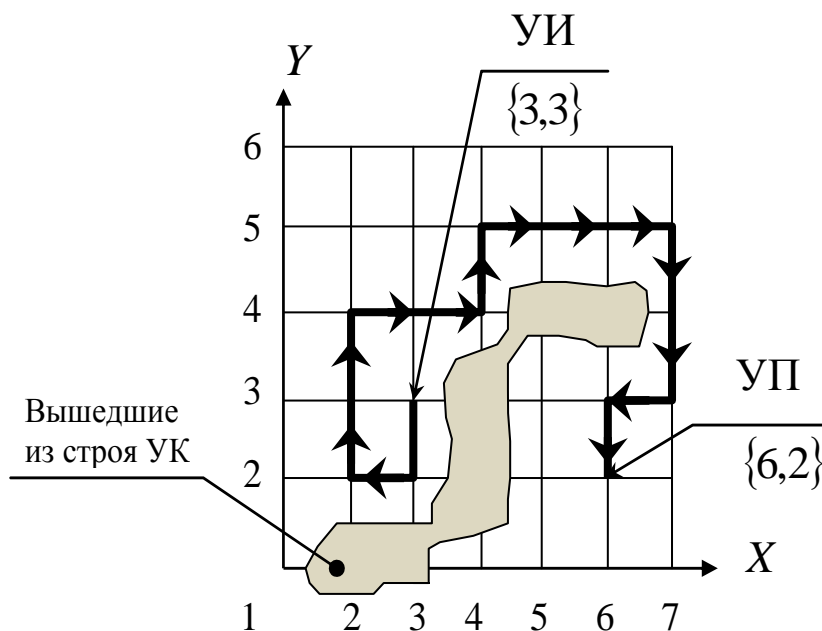


Рис. 6. Пример организации «Диффузного вероятностно-детерминированного последовательного с логическим методом формирования плана распределения информации» метод маршрутизации

Формулы расчета вероятностей перехода по четырем направлениям будут иметь вид:

$$P_1 = \frac{L+1}{4 \cdot L+2}; P_2 = \frac{L+1}{4 \cdot L+2}; P_3 = \frac{L}{4 \cdot L+2}; P_4 = \frac{L}{4 \cdot L+2},$$

где  $L = |D_x| + |D_y|$ ;  $P_1, P_2, P_3 \in P_4$  – вероятности перехода по первому, второму, третьему и четвертому направлениям поиска маршрута соответственно.

«Локально-волновой с детерминированным выбором зоны поиска маршрута и логическим методом формирования плана распределения информации» метод маршрутизации позволяет организовать маршрут между УИ и УП с минимальным количеством транзитных УК. При этом на сети организуется «Лавинный» поиск, но не во всех направлениях, а лишь в сторону УП. Поиск распространяется в пределах зоны, охватывающей только кратчайшие маршруты (рис. 1). Если на сети связи между УИ и УП нет кратчайших маршрутов, то заявке, поступившей от УИ, дается отказ в обслуживании.

Таким образом, данный метод состоит в определении всех направлений (используя последовательно операции (4), (5) и (6)), которые могут установить кратчайшие маршруты между парой УК. В случае отсутствия доступных ТПС в вычисленных направлениях, для узлов, расположенных в зоне поиска маршрута, процесс поиска маршрута начинает «Сворачиваться».

На рис. 7, а показан пример организации маршрута между УИ и УП с координатами,  $\{2,2\}$  и  $\{7,5\}$ . Пунктиром указаны те ТПС, которые остались подключенными на момент установления маршрута между заданной парой УК. Остальные ТПС, участвующие в поиске маршрута, освободились.

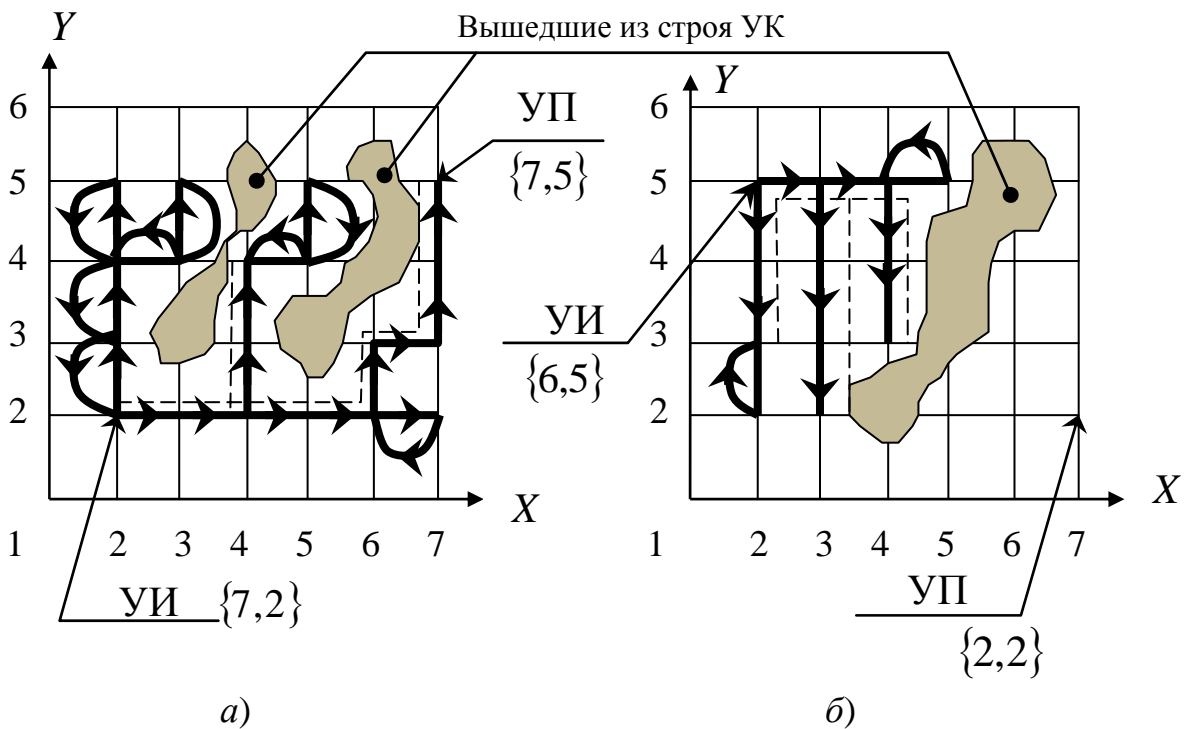


Рис. 7. «Локально-волновой с детерминированным выбором зоны поиска маршрута и логическим методом формирования плана распределения информации» метод маршрутизации

Рис. 6, б показывает попытку установления соединения между парой УК. Однако вышедшие из строя УК не дают возможности организовать такой маршрут и данной заявке, поступившей от УИ {2,5}, дается отказ в обслуживании.

В силу сложности данного метода маршрутизации (параллельность распространения процессов поиска маршрута от УИ до УП; «Сворачивание» отдельных направлений; выделение одного маршрута из множества просмотренных) расчет (7) не пригоден.

### ***Упрощенная имитационная модель анализа маршрутизации***

Опишем упрощенную имитационную модель сети связи, в которой выделим процедуру маршрутизации и сгладим процесс передачи пользовательской информации.

Каждый из методов маршрутизации использует часть ресурса сети связи для нахождения маршрутов между УИ и УП. Следовательно, количество одновременно установленных соединений ( $\Xi$ ) с применением различных методов маршрутизации будет различно. Таким образом, в качестве критерия сравнения методов маршрутизации можно использовать способность сети связи пропустить максимальную нагрузку между парами УИ и УП, выраженную в количестве одновременно установленных соединений ( $\Xi$ ).

Введем следующие обозначения:

$\tilde{\Xi}$  – среднее количество установленных соединений за  $N_1$  испытаний методом статистического моделирования;

$\Xi_{\max}$  – максимально возможное количество соединений на сети, которое рассчитывается следующим образом:

$$\Xi_{\max} = \frac{R_0}{L_{\text{ср}}},$$

где  $R_0$  – сетевой ресурс сети связи – совокупность ТПС анализируемой сети связи;

$L_{\text{ср}}$  – средняя длина маршрута между УИ и УП.

Тогда выражение

$$W = \frac{\tilde{\Xi}}{\Xi_{\max}} \quad (8)$$

будет определять коэффициент пропускной способности сети.

Представим граф сети  $G[A_S, M_S]$  матрицей виртуальных каналов (ВК)  $K = \|k_{i,j}\|_{S,S}$ , где элемент матрицы  $k_{i,j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j$  указывает количество ВК между УК  $a_i$  и  $a_j$ .

Алгоритм (рис. 8) упрощенной имитационной модели маршрутизации в условиях внешнего деструктивного воздействия на элементы сети связи методом статистического моделирования состоит из следующих шагов.

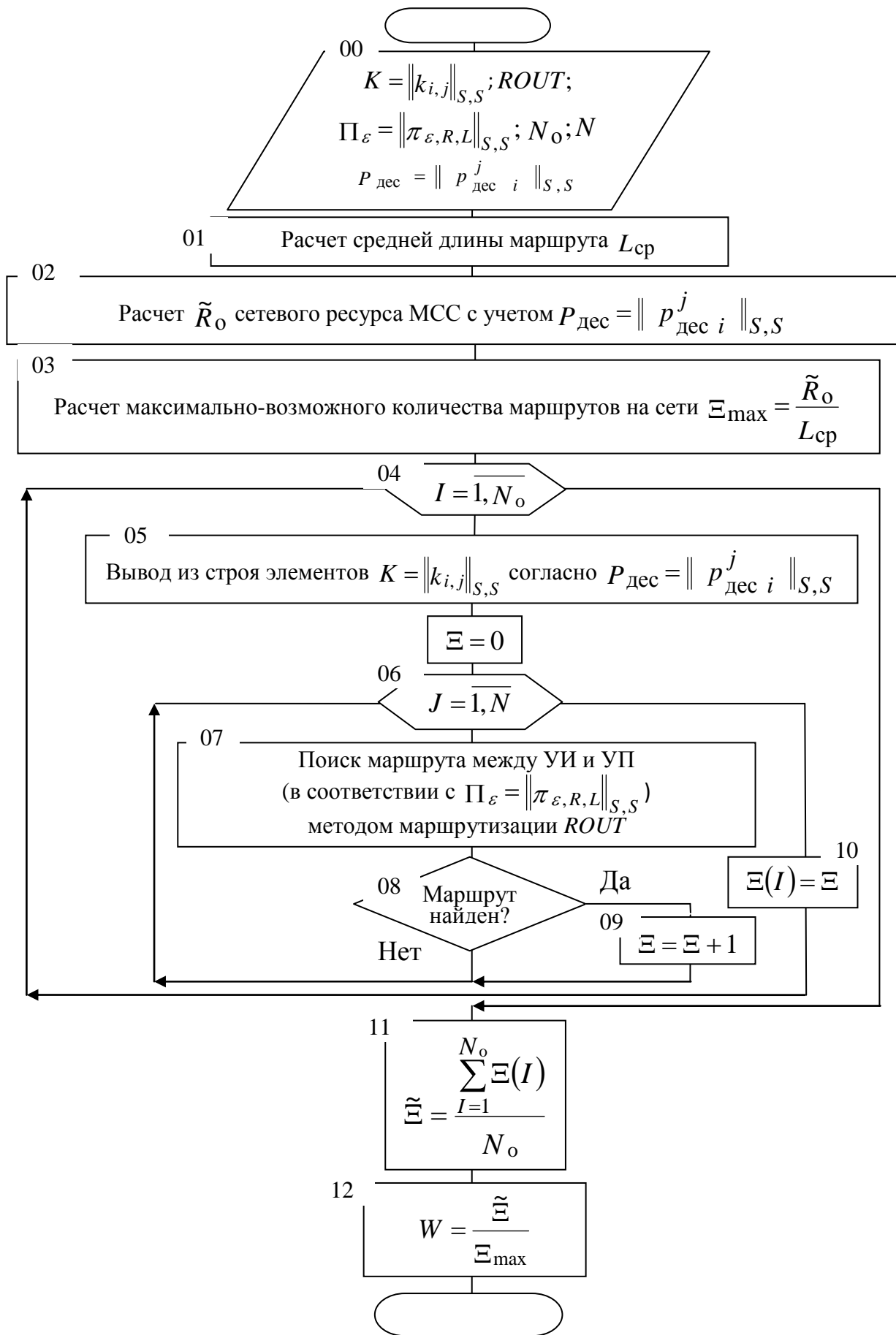


Рис. 8. Алгоритм упрощенной имитационной модели маршрутизации

1. Исходными данными являются (оператор 00):

$K = \|k_{i,j}\|_{S,S}$  - матрица виртуальных каналов анализируемой сети связи;

$ROUT$  - метод маршрутизации;  $\Pi_\varepsilon = \|\pi_{\varepsilon,R,L}\|_{S,S}$  - матрица тяготений между УИ

и УП;  $P_{\text{дес}}^j = \|p_{\text{дес } i}^j\|_{S,S}$  - матрица деструктивных воздействий на элементы сети связи;  $N$  - количество заявок, поступающих в сеть связи;  $N_0$  - количество испытаний методом статистического моделирования [3].

2. В соответствии с матрицей тяготений  $\Pi_\varepsilon = \|\pi_{\varepsilon,R,L}\|_{S,S}$  рассчитывается средняя длина маршрута между УИ и УП ( $L_{\text{ср}}$ ) на сети  $G[A_S, M_S]$  (оператор 01).

3. Суммированием всех ВК, преобразованной сети  $K = \|k_{i,j}\|_{S,S}$  (с учетом заданной матрицы деструктивных воздействий на элементы сети связи  $P_{\text{дес}}^j = \|p_{\text{дес } i}^j\|_{S,S}$ ), определяется сетевой ресурс анализируемой сети ( $R_0$ ). Преобразование матрицы  $K = \|k_{i,j}\|_{S,S}$  (с учетом заданных параметров  $P_{\text{дес}}^j = \|p_{\text{дес } i}^j\|_{S,S}$ ) осуществляется вывод из строя элементов сети. То есть генерируют  $\kappa$  независимых случайных равномерно распределенных в интервале (0,1) чисел  $X_\varphi$ . Затем значения  $X_\varphi$  последовательно сравнивают с величинами матрицы  $P_{\text{дес}}^j = \|p_{\text{дес } i}^j\|_{S,S}$  по следующему правилу:

$$\begin{cases} \text{если } p_{\text{дес } i}^j \geq p_\varphi \Rightarrow \text{элемент графа считается выведенным из строя } k_{ij} = 0; \\ \text{если } p_{\text{дес } i}^j < p_\varphi \Rightarrow \text{элемент графа } k_{ij} \text{ находится в исправном состоянии.} \end{cases} \quad (9)$$

Учитывая, что процесс вывода из строя виртуальных каналов  $K = \|k_{i,j}\|_{S,S}$  носит вероятностный характер, то данную процедуру необходимо выполнить  $N_0$  раз. После чего вычислить среднее значение сетевого ресурса сети связи:

$$\tilde{R}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} R_0^{(i)}}{N_0},$$

где

$R_0^{(i)}$  – сетевой ресурс сети связи в  $i$ -м испытании;

$N_0$  – количество испытаний и определяется точностью результата моделирования [3].

4. Оператором 03 вычисляется максимально возможное количество маршрутов на сети  $G[A_S, M_S]$ :

$$\Xi_{\text{max}} = \frac{\tilde{R}_0}{L_{\text{ср}}}.$$

5. Начиная с 04 оператора до 10 оператора (рисунок 4.14) выполняется процесс формирования статистических данных за  $N_{\hat{1}}$  испытаний. Каждое испытание состоит из следующих процедур.

6. Оператором 05 имитируется внешнее деструктивное воздействие на элементы сети связи. Для этого, используя алгоритм (9) выполняется вывод из строя элементов матрицы  $K = \|k_{i,j}\|_{S,S}$ .

7. Операторы 06 ÷ 09 (рисунок 8) выполняют на преобразованной матрице (по окончании процедуры воздействия внешних деструктурирующих факторов на элементы сети связи)  $N$  действий: поиск маршрутов; в случае нахождения маршрута осуществляется занятие соответствующих ВК; подсчет количества установленных маршрутов. Для этого случайным образом в соответствии с матрицей тяготений  $\Pi_{\varepsilon} = \|\pi_{\varepsilon,R,L}\|_{S,S}$  производится выбор УИ и УП. Методом маршрутизации *ROUT* устанавливается соединение между УИ и УП. Если соединение не установлено, то выбирается новая пара УИ и УП и попытка установления повторяется. В случае установления соединения значение переменной  $\Xi$  увеличивается на единицу. Установленное соединение между УИ и УП остается занятым до конца испытания. То есть, соответствующие ВК в преобразованной матрице  $K = \|k_{i,j}\|_{S,S}$  (по окончании процедуры воздействия внешних деструктивных факторов на элементы сети связи) считаются занятыми. По окончании действия операторов 06 ÷ 09 подсчитанное значение количества установленных соединений в данном испытании запоминается оператором 10.

8. Оператором 11 рассчитывается среднее значение установленных соединений за  $N_{\hat{1}}$  испытаний:

$$\bar{\Xi} = \frac{\sum_{I=1}^{N_o} \Xi(I)}{N_o}.$$

9. Оператором 12 вычисляется искомое значения (8).

Таким образом, если при моделировании анализируемые методы маршрутизации получили разные  $W$ , то предпочтительным считается тот, у которого коэффициент пропускной способности выше.

***Результаты статистического моделирования маршрутизации на упрощенной имитационной модели сети связи.***

На рис. 9 приведены результаты статистического моделирования процедур маршрутизации на упрощенной имитационной модели сети связи при следующих условиях:



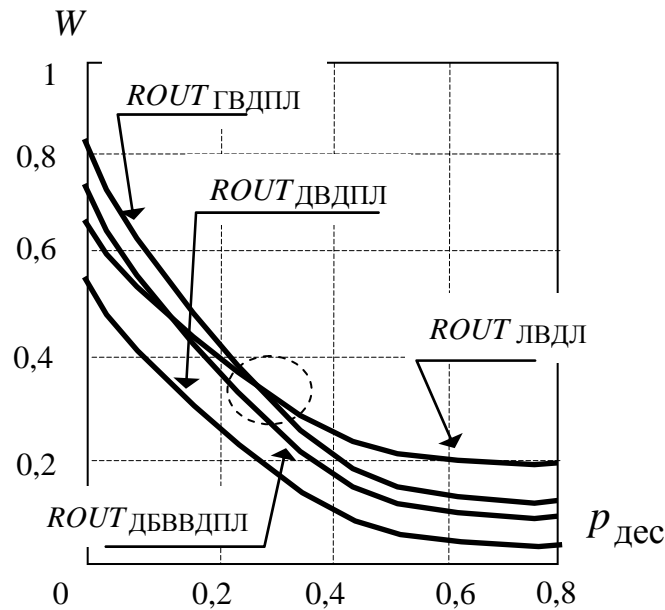


Рис. 9. Зависимость  $W = f(P_{\text{дес}})$  для различных методов маршрутизации

- при определении плана распределения информации использовалась методика для однородной ячеистой сети связи большой размерности;
- максимальное количество УК по оси X  $X_{\text{max}} = 10$ ;
- максимальное количество УК по оси Y  $Y_{\text{max}} = 5$ ;
- количество УК в анализируемой сети связи  $S = X_{\text{max}} \cdot Y_{\text{max}} = 50$ ;
- $k_{i,j} = 8; i, j = \overline{1,50}$ ;
- $p_{\text{аан}} = p_{\text{аан}}^j; i, j = \overline{1, S}$ , значение которой изменялось от 0 до 0,8 с шагом  $\Delta p_{\text{аан}} = 0,2$ ;
- равновероятный выбор УИ и УП, то есть значения элементов матрицы тяготений  $\pi_{i,j} = \frac{1}{S^2}; i, j = \overline{1, S}$ ;
- $N_o = 1000$ , обеспечивающих относительную погрешность результатов статистического моделирования не более 8 процентов.

При выше перечисленных исходных данных анализировались следующие методы маршрутизации [1]:

- «Градиентный вероятностно-детерминированный последовательный с логическим методом формирования плана распределения информации»;
- «Диффузный без возвращения назад вероятностно-детерминированный последовательный с логическим методом формирования плана распределения информации»;
- «Диффузный вероятностно-детерминированный последовательный с логическим методом формирования плана распределения информации»;

– «Локально-лавинный с детерминированным выбором зоны поиска маршрута и логическим методом формирования плана распределения информации».

Анализ результатов моделирования методов маршрутизации показал, что при отсутствии или незначительном внешнем деструктивном воздействии (в условиях, при котором до 20 % сетевых ресурсов выходит из строя) целесообразно применять «Статистические» методы маршрутизации. В случае выхода из строя более 20 % сетевых ресурсов необходимо использовать «Лавинные» методы маршрутизации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков С. Н. Классификация методов маршрутизации в мультисервисных сетях связи / С. Н. Новиков // Вестник СибГУТИ. – 2013. – № 1 (21). – С. 57–67.
2. Новиков С. Н. Математическая модель анализа многоадресной маршрутизации в мультисервисной сети связи / С. Н. Новиков, В. О. Жарикова // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1(25), ч. 2. – С. 92–96.
3. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1968. – 356 с.

© С. Н. Новиков, 2018