УДК 004.632
DOI: 10.33764/2618-981X-2019-9-3-14

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ РАЗРУШАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Сергей Николаевич Новиков
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, зав. кафедрой информационной безопасности, e-mail: snovikov@ngs.ru

В работе предложена математическая модель функционирования мультисервисной сети связи в условиях внешних деструктивных воздействий, учитывающая: структуру сети; пропускные способности трактов передачи сообщений; вероятностно-временные параметры (интенсивность поступления, плотность распределения) входящего в сеть информационного потока пакетов сообщений различных приложений; метод маршрутизации.

Ключевые слова: мультисервисная сеть связи, внешние деструктивные воздействия.

MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONING OF MODERN TELECOMMUNICATION SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF EXTERNAL DELIBERATE DESTRUCTIVE INFLUENCES

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

The paper proposes a mathematical model of the functioning of a multiservice communication network under external destructive influences, taking into account: network structure, capacity of message transmission paths; probabilistic-temporal parameters (intensity of income, density of distribution) of information packet of messages of various applications entering the network; routing method.

Key words: multiservice communication network, external destructive influences.

Концепция логической структуры математической модели

На рис. 1 представлена концепция математической модели.

Исходными данными являются: структура мультисервисной сети связи (МСС) с множеством узлов коммутации (УК) и линий связи (ЛС); метод маршрутизации; входящий в МСС асинхронный поток пакетов различных приложений, доступных пользователям; степень тяготения УИ к УП для передачи пакетов сообщений ε-го приложения МСС; внешнее деструктивное воздействие на элементы МСС.

Каждое приложение МСС характеризуется вероятностно-временными характеристиками (скорость передачи, время задержки, временной джиттер, вероятность ошибочного приема на символ, пакет, сообщение и многие другие). Неподдержание данных параметров (со стороны МСС) приводит к отказу в обслуживании данных приложений, следовательно, к снижению QoS МСС.

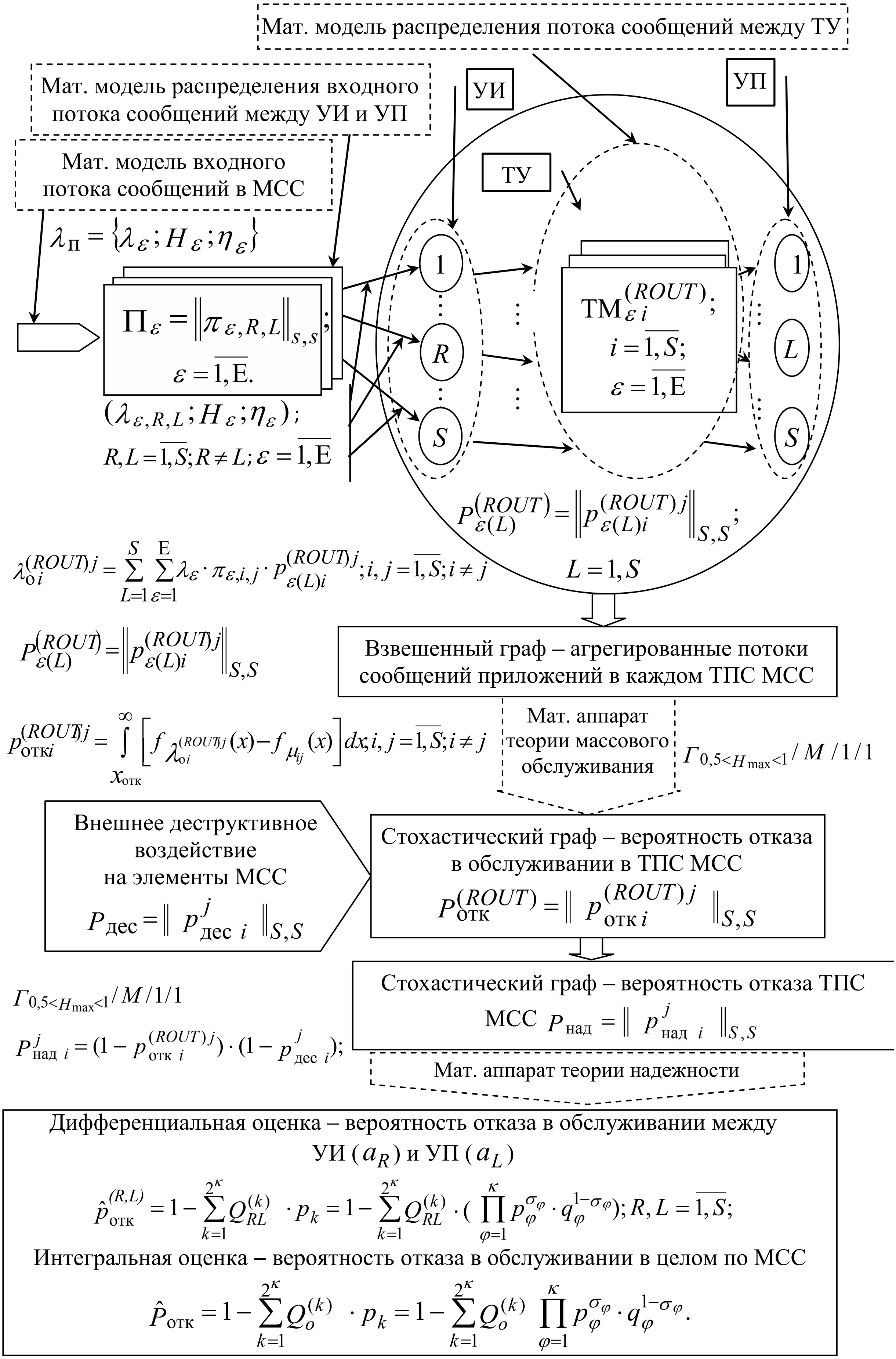

Рис. 1. Концепция математической модели маршрутизации в МСС

В этой связи обобщающим параметром качества функционирования МСС примем вероятность отказа в обслуживании выбранных пользователями приложений.

Таким образом, критериями функционирования МСС примем: вероятность отказа в обслуживании в целом по МСС – интегральная оценка; вероятность отказа в обслуживании между каждой парой УИ и УП в МСС – дифференциальная оценка.

Порядок определения искомых вероятностей следующий. Входящий в МСС информационный поток пакетов сообщений ε-го приложения в соответствии со степенью тяготения УИ к УП дезагрегируется на отдельные потоки, которые поступают в соответствующие УИ для последующей передачи в соответствующие УП.

В каждом тракте передачи сообщений (ТПС) формируются виртуальные каналы (ВК) и виртуальные тракты (ВТ) передачи сообщений. Это означает что, на канальном уровне МВОС в трактах передачи сообщений формируется асинхронный поток пакетов (Π_i) (рис. 2).

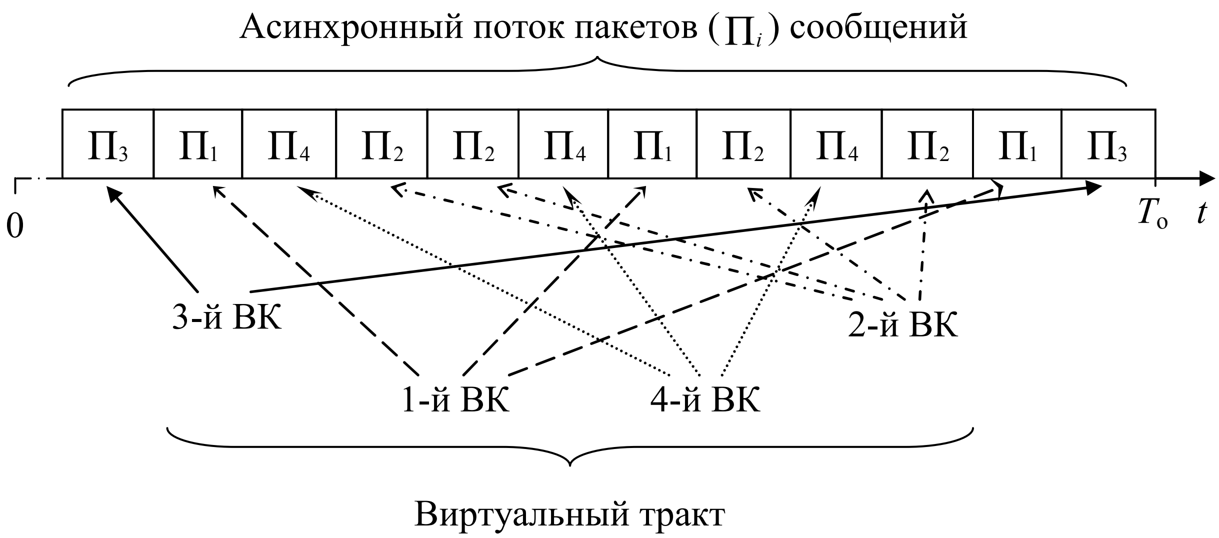

Рис. 2. Пример формирования ВК в одном ВТ за время наблюдения $T_о$

Подчиняясь заранее определенной процедуре маршрутизации, потоки сообщений различных приложений в каждом УК (УИ и транзитных узлах (ТУ)) распределяются по всем трактам передачи сообщений МСС. Далее, агрегируя распределенные потоки сообщений в каждом тракте, определяется суммарный поток каждого тракта передачи сообщений МСС. Учитывая, что ТПС обладает определенной пропускной способностью, появляется возможность применить аппарат теории массового обслуживания. А именно, определить вероятность отказа в обслуживании агрегируемого потока сообщений в каждом тракте МСС. В результате получаем стохастический граф, ребрам которого присвоены вероятности отказа обслуживания приложений МСС.

Внешнее деструктивное воздействие (ВДВ) реализуется в заранее заданных вероятностях отказа ТПС мультисервисной сети связи. Если допустить, что вероятности отказа обслуживания приложений МСС в каждом ТПС и вероятности отказа самих ТПС (по причине ВДВ) являются независимыми событиями, то данные вероятности перемножаются. В результате получаем новый стохастический граф, ребрам которого присвоены вероятности их отказа.

Далее, используя математический аппарат теории надежностей, имеется возможность расчета искомых значений.

Таким образом, изменяя: основные параметры МСС (структуру, пропускные способности ТПС); вероятностно-временные параметры (интенсивность поступления, плотность распределения) входящего в МСС информационного потока пакетов сообщений; параметры ВДВ на МСС, имеется возможность провести анализ функционирования МСС в условиях ВДВ.

Формальное описание исходных данных математической модели

1. Структуру МСС представим в виде неориентированного графа $G[A_S, M_S]$ с множеством: вершин $A_S = \{a_i\}; i = \overline{1,S}$, соответствующих УК; ребер $M_S = \{m_{ij}\}; i, j = \overline{1,S}; i \neq j$, соответствующих ТПС.

Каждый ТПС характеризуется пропускной способностью $\mu_{ij}; i, j = \overline{1,S}; i \neq j$ – наибольшим количеством пакетов, передаваемых за единицу времени. В качестве допущения примем, что длительность обслуживания пакетов сообщений поступающего асинхронного потока данных в ТПС между a_i и a_j УК $i, j = \overline{1,S}; i \neq j$ (рис. 2) подчиняется экспоненциальному закону с параметром:

$$w_{ij} = \frac{1}{\mu_{ij}}; i, j = \overline{1,S}; i \neq j. \qquad (1)$$

2. Метод маршрутизации $ROUT = \{ROUT_{\text{тм}} \uparrow ROUT_{\text{сс}}\}$ зададим процедурой выбора исходящих ТПС на множестве S пошаговых таблиц маршрутизации для ε-го приложения:

$$P_{\varepsilon}^{(j)} = \left\| p_{\varepsilon,i,\nu}^{(j)} \right\|_{(S-1),\chi_j} = \left(\overline{p_{\varepsilon,1}^{(j)}}, \ldots, \overline{p_{\varepsilon,i}^{(j)}}, \ldots, \overline{p_{\varepsilon,j-1}^{(j)}}, \overline{p_{\varepsilon,j+1}^{(j)}}, \ldots, \overline{p_{\varepsilon,S}^{(j)}} \right), \varepsilon = \overline{1,\mathrm{E}}, \qquad (2)$$

где $\overline{P_{\varepsilon,i}^{(j)}} = (p_{\varepsilon,i,\nu}^{(j)}); \sum_{\nu=1}^{\chi_j} p_{\varepsilon,i,\nu}^{(j)} = 1; \nu = \overline{1,\chi_j}; i, j = \overline{1,S};$ χ_j – степень a_j-го УК.

Матрицей (2) задается план распределения информации для ε-го приложения.

Элементы вектора $\overline{p_{\varepsilon,i}^{(j)}}$ определяют вероятность того, что для ε-го приложения на этапе поиска маршрута к a_j-му УП в a_i-м транзитном УК, начиная с УИ, будет выбрана ν-я исходящая ЛС.

3. Входящий в МСС информационный поток характеризуется интенсивностью поступления пакетов сообщений ε-го приложения в a_R-й УИ для последующей передачи в a_L-й УП:

$$(\lambda_{\varepsilon,R,L};H_{\varepsilon};\eta_{\varepsilon}), \tag{3}$$

где H_{ε} – параметр Херста ε-го приложения; η_{ε} – средняя длина пакетов сообщений ε-го приложения.

Плотность распределения вероятностей последовательности промежутков между вызовами поступления пакетов сообщений ε-го приложения в a_R-й УИ для последующей передачи в a_L-й УП определим выражением:

$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{\lambda_{\varepsilon,R,L}^{H_{\varepsilon}}\cdot x^{H_{\varepsilon}-1}\cdot e^{-\lambda_{\varepsilon,R,L}\cdot x}}{\Gamma(H_{\varepsilon})}; R,L=\overline{1,S}; R\neq L; \varepsilon=\overline{1,\mathrm{E}}; x\geq 0;\\ 0, \qquad x<0,\end{cases} \tag{4}$$

где $\Gamma(H_{\varepsilon})=\int\limits_0^{\infty}x^{H_{\varepsilon}-1}\cdot e^{-x}dx$ – гамма-функция.

В работе [2] получены результаты, утверждающие, что при агрегировании самоподобных потоков результирующий поток будет тоже самоподобным с параметрами:

$$H=\max_i(H_i); i=\overline{1,N}; \lambda=\sum_{i=1}^{N}\lambda_i. \tag{5}$$

Следовательно, интенсивность потока данных ε-го приложения, поступающего в МСС, составит:

$$\lambda_{\varepsilon}=\sum_{R,L=1}^{S}\lambda_{\varepsilon,R,L}.$$

4. Вероятность поступления потока данных ε-го приложения в a_R-й УИ для его последующей передачи a_L-му УП определяется матрицей тяготений:

$$\Pi_{\varepsilon}=\left\|\pi_{\varepsilon,R,L}\right\|_{S,S},$$

где $0 \le \pi_{\varepsilon,R,L} = \dfrac{\lambda_{\varepsilon,R,L}}{\lambda_{\varepsilon}} \le 1; \sum\limits_{R,N=1}^{S} \pi_{\varepsilon,R,L} = 1; \varepsilon = \overline{1,\text{E}}.$

5. ВДВ на элементы МСС представим в виде матрицы:

$$P_{\text{дес}} = \| \; p^{j}_{\text{дес} \; i} \; \|_{S,S},$$

где $p^{j}_{\text{дес} \; i}$ – вероятность выхода из строя ребра $m_{i,j}$ исходного графа $G[A_S, M_S]$, описывающего структуру мультисервисной сети связи.

Критериями оценки функционирования МСС примем:

$$\{\hat{P}_{\text{отк}}; \hat{p}^{(R,L)}_{\text{отк}}\} = f\{G[A_S, M_S]; \Pi_{\varepsilon}; \lambda_{\varepsilon}; H_{\varepsilon}; \mu; ROUT; P_{\text{дес}}\}; R, L = \overline{1,L}; R \ne L; \varepsilon = \overline{1,\text{E}}, \quad (6)$$

где $\hat{P}_{\text{отк}}$ – вероятность отказа в обслуживании в целом по сети – интегральная оценка; $\hat{p}^{(R,L)}_{\text{отк}}; R, T = \overline{1,L}; R \ne L$ – вероятность отказа в обслуживании между УИ (a_R) и УП (a_L) – дифференциальная оценка.

Разработка математической модели распределения потока сообщений между транзитными узлами МСС

Отождествим вершины графа (сети) $G[A_S, M_S]$ с состояниями конечной цепи Маркова. Из набора векторов (2) для метода маршрутизации $ROUT$ и ε-го приложения МСС при поиске a_L-го УК можно получить матрицу переходных вероятностей [1]:

$$P^{(ROUT)}_{\varepsilon(L)} = \left\| p^{(ROUT)j}_{\varepsilon(L)i} \right\|_{S,S} i, j = \overline{1,S},$$

где $p^{(ROUT)j}_{\varepsilon(L)i}; i, j = \overline{1,S}$ – вероятность перехода из состояния a_i в a_j конечной цепи Маркова для метода маршрутизации $ROUT$ и ε-го приложения МСС при поиске a_L-го УК. Причем состояние a_L, соответствующее a_L-му УК (УП), определим поглощающим, т.е.

$$p^{(ROUT)L}_{\varepsilon(L)L} = 1.$$

Матрица переходных вероятностей, описывающая вероятности переходов для поиска a_L-го УК при методе маршрутизации $ROUT$ и ε-м приложении МСС, будет иметь вид:

$$
\begin{array}{c|cccccc|}
 & 1 & \cdots & L & \cdots & (S-1) & S \\
1 & 0 & \cdots & p_{\varepsilon(L)\;\;1}^{(ROUT)L} & \cdots & p_{\varepsilon(L)\;\;1}^{(ROUT)S-1} & p_{\varepsilon(L)\;\;1}^{(ROUT)S} \\
\vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\
L & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\
S-1 & p_{\varepsilon(L)\;\;S-1}^{(ROUT)1} & \cdots & p_{\varepsilon(L)\;\;S-1}^{(ROUT)L} & \cdots & 0 & p_{\varepsilon(L)\;\;S-1}^{(ROUT)S} \\
S & p_{\varepsilon(L)\;\;S}^{(ROUT)1} & \cdots & p_{\varepsilon(L)\;\;S}^{(ROUT)L} & \cdots & p_{\varepsilon(L)\;\;S}^{(ROUT)S-1} & 0
\end{array}. \qquad (7)
$$

Интенсивность потоков в ТПС $m_{ij}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j$ при поиске a_L-го УК, методе маршрутизации $ROUT$ и ε-м приложении МСС составит:

$$\lambda_{\varepsilon(L)i}^{(ROUT)j} = p_{\varepsilon(L)i}^{(ROUT)j} \cdot \lambda_{\varepsilon,i,L}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j,$$

причем из свойства конечных цепей Маркова имеем:

$$\lambda_{\varepsilon,i,L} = \sum_{j=1}^{S} \lambda_{\varepsilon(L)i}^{(ROUT)j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j.$$

Общие интенсивности потоков всех $\varepsilon = \overline{1, \mathrm{E}}$. приложений в ТПС $m_{i,j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j$ при заданном методе маршрутизации $ROUT$ определятся из системы уравнений:

$$\lambda_{\mathrm{o}\,i}^{(ROUT)j} = \sum_{L=1}^{S} \sum_{\varepsilon=1}^{\mathrm{E}} \lambda_{\varepsilon(L)i}^{(ROUT)j} = \sum_{L=1}^{S} \sum_{\varepsilon=1}^{\mathrm{E}} p_{\varepsilon(L)i}^{(ROUT)j} \cdot \lambda_{\varepsilon,i,L}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j$$

или

$$\lambda_{\mathrm{o}\,i}^{(ROUT)j} = \sum_{L=1}^{S} \sum_{\varepsilon=1}^{\mathrm{E}} \lambda_{\varepsilon} \cdot \pi_{\varepsilon,i,j} \cdot p_{\varepsilon(L)i}^{(ROUT)j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j, \qquad (8)$$

где λ_{ε} – интенсивность поступления потока данных ε-го приложения в МСС;

$\pi_{\varepsilon,i,j}$ – элемент матрицы тяготений Π_{ε}; $p_{\varepsilon(L)\,i}^{(ROUT)j}$ – элемент матрицы переходных вероятностей $P_{\varepsilon(L)}^{(ROUT)}$.

В результате получаем взвешенный граф, каждому ребру которого присвоены агрегированные потоки сообщений всех Е приложений:

$$\lambda_{\mathrm{o}}^{(ROUT)} = \| \; \lambda_{\mathrm{o}\,i}^{(ROUT)j} \; \|_{S,S}. \qquad (9)$$

Так как входящие информационные потоки в мультисервисную сеть связи подчиняются гамма-распределению с параметрами $(\lambda_{\varepsilon,R,L};H_{\varepsilon};\eta_{\varepsilon})$, то с учетом (5) можно утверждать, что и агрегированные потоки сообщений (9) тоже подчиняются гамма-распределению. При этом параметр Херста выбирается максимальным из всех $H_{\varepsilon};\varepsilon=\overline{1,\mathrm{E}}$.

Принятое ограничение (1) (экспоненциальный закон распределения длительности обслуживания пакетов сообщений) с параметром

$$w_{ij}=\frac{1}{\mu_{ij}};i,j=\overline{1,S};i\neq j,$$

позволяет воспользоваться математическим аппаратом теории массового обслуживания для расчета вероятности отказа в обслуживании агрегированных потоков сообщений (9) в ТПС между a_i и a_j УК.

Каждое ребро графа (9) в обозначениях Кендалла представим как $\Gamma_{0,5<H_{\max}<1}/M/1/1$. Здесь $\Gamma_{0,5<H_{\max}<1}$ – обозначение гамма-распределения (с параметром Херста $0,5<H_{\max}<1$ и интенсивностью $\lambda_{\text{o}\,i}^{(ROUT)j};i,j=\overline{1,S};i\neq j$) случайной длины интервала между соседними требованиями входного потока; M – экспоненциальная функция распределения случайного времени обслуживания агрегированных потоков сообщений с параметром:

$$w_{ij}=\frac{1}{\mu_{ij}};i,j=\overline{1,S};i\neq j.$$

Из графического представления плотности распределения случайной длины интервала между соседними требованиями входного потока ($f_{\lambda_{\text{o}\,i}^{(ROUT)j}}(x)$) и плотности распределения случайного времени обслуживания агрегированных потоков сообщений ($f_{\mu_{ij}}(x)$) (рис. 3) определим общее выражение вероятности отказа в обслуживании агрегированных потоков сообщений (9) в ТПС между a_i и a_j УК:

$$p_{\text{отк}\,i}^{(ROUT)j}=\int\limits_{x_{\text{отк}}}^{\infty}\left[f_{\lambda_{\text{o}\,i}^{(ROUT)j}}(x)-f_{\mu_{ij}}(x)\right]dx;i,j=\overline{1,S};i\neq j. \tag{10}$$

Окончательно получим:

$$p_{\text{отк}\,i}^{(ROUT)j}=\int\limits_{x_{\text{отк}}}^{\infty}\left[\frac{\lambda_{\text{o}\,i}^{(ROUT)H_{\max}j}\cdot x^{H_{\max}-1}\cdot e^{-\lambda_{\text{o}\,i}^{(ROUT)j\cdot x}}}{\int\limits_{0}^{\infty}x^{H_{\max}-1}\cdot e^{-x}dx}-\mu_{ij}e^{-\mu_{ij}\cdot x}\right]dx;i,j=\overline{1,S};i\neq j. \tag{11}$$

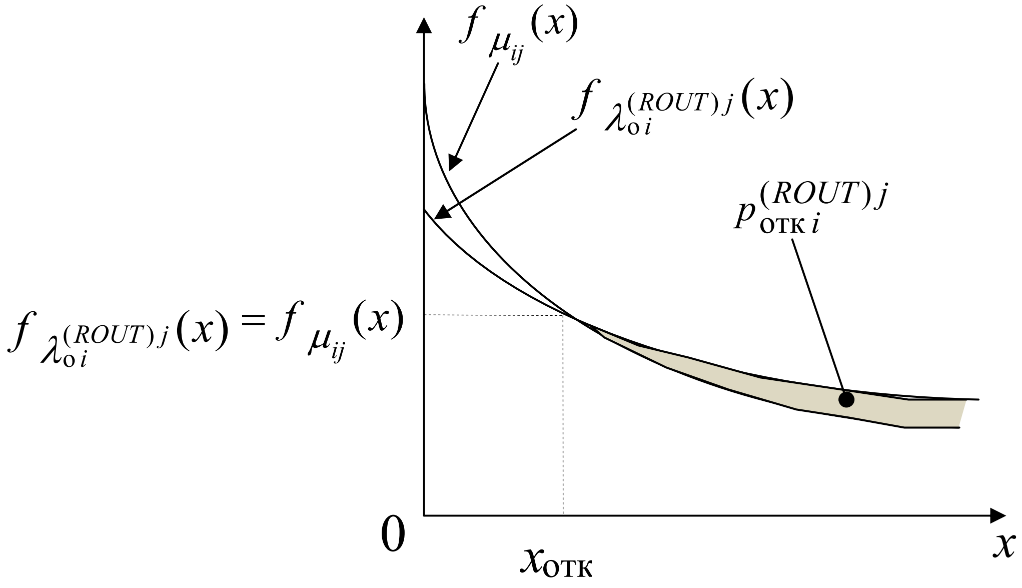

Рис. 3. Графическое определение общего выражения вероятности отказа в обслуживании агрегированных потоков сообщений в ТПС

Для практических исследований воспользуемся результатом работы [3], в которой искомая вероятность отказа в обслуживании получена для случая $\Gamma_{0,5}/M/1/N$:

$$p = \frac{\left(1 - \frac{\rho}{4} - \sqrt{\frac{\rho^2}{16} + \frac{\rho}{2}}\right)}{1 - \left(\frac{\rho}{4} + \sqrt{\frac{\rho^2}{16} + \frac{\rho}{2}}\right)^{N+1}} \left(\frac{\rho}{4} + \sqrt{\frac{\rho^2}{16} + \frac{\rho}{2}}\right)^{N},$$

где $\rho = \dfrac{\lambda}{\mu}$; λ – интенсивность поступления заявок на входе системы массового обслуживания (СМО); μ – производительность обслуживающей линии СМО.

Таким образом, вероятность отказа в обслуживании агрегированных потоков сообщений в ТПС между a_i и a_j УК будем определять следующим образом:

$$p_{\text{отк}\,i}^{(ROUT)\,j} = \frac{\left(1 - \frac{\rho_i^{(ROUT)\,j}}{4} - \sqrt{\frac{\rho_i^{(ROUT)\,j\;2}}{16} + \frac{\rho_i^{(ROUT)\,j}}{2}}\right)}{1 - \left(\frac{\rho_i^{(ROUT)\,j\;2}}{4} + \sqrt{\frac{\rho_i^{(ROUT)\,j\;2}}{16} + \frac{\rho_i^{(ROUT)\,j}}{2}}\right)^{2}} \times$$

$$\times\left(\frac{\rho_i^{(ROUT)J}}{4}+\sqrt{\frac{\rho_i^{(ROUT)j\ 2}}{16}+\frac{\rho_i^{(ROUT)j}}{2}}\right); i,j=\overline{1,S}; i\neq j.$$

В результате получим стохастический граф, ребрам которого присвоены вероятности отказа в обслуживании в каждом ТПС для всех $\varepsilon=\overline{1,\mathrm{E}}.$ приложений МСС:

$$P_{\text{отк}}^{(ROUT)}=\| \ p_{\text{отк}\ i}^{(ROUT)j} \ \|_{S,S}. \tag{12}$$

Допустим, что внешнее деструктивное воздействие на элементы МСС и вероятности событий (12) являются независимыми. Тогда вероятности надежности ТПС МСС определим следующим образом:

$$P_{\text{над}\ i}^{j}=(1-p_{\text{отк}\ i}^{(ROUT)j})\cdot(1-p_{\text{дес}\ i}^{j}); i,j=\overline{1,S}; i\neq j. \tag{13}$$

В результате имеем стохастический граф, ребрам которого присвоены вероятности надежности всех ТПС МСС:

$$P_{\text{над}}=\| \ p_{\text{над}\ i}^{j} \ \|_{S,S}. \tag{14}$$

Далее, используя математический аппарат теории надежности [4], появляется возможность определить искомые значения (6). Для этого воспользуемся методом полного перебора оценки структурной надежности телекоммуникационной системы.

Пронумеруем элементы множества $M=\{m_{ij}\}; i,j=\overline{1,S}; i\neq j$ числами натурального ряда $M=\{m_{ij}\}=\{m_\upsilon\}; i,j=\overline{1,S}; i\neq j; \varphi=\overline{1,\kappa}.$ Каждое ребро анализируемого графа может находиться в двух состояниях:

$$\begin{cases}\sigma_\varphi=1\ \ (m_{ij}\ \text{исправно) с вероятностью}\ p_\varphi=p_{\text{над}\,i}^{j}; i,j=\overline{1,S}; i\neq j; \varphi=\overline{1,\kappa};\\ \sigma_\varphi=0\ \ (m_{ij}\ \text{вышло из строя) с вероятностью}\ q_\varphi=1-p_\varphi.\end{cases}$$

В этом случае анализируемый граф может находиться в одном из $k=\overline{1,2^\kappa}$ состояний. Вероятность каждого из возможных состояний графа определяется:

$$p_k=\prod_{\varphi=1}^{\kappa}p_\varphi^{\sigma_\nu}\cdot q_\varphi^{1-\sigma_\varphi}; k=\overline{1,2^\kappa}.$$

Введем переменные:

$$Q_o^{(k)} = \begin{cases} 1, \text{если граф, находясь в } k \text{ - м состояни, связен;} \\ 0, \text{ в противном случае;} \end{cases}$$

$$Q_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1, \text{если граф, находясь в } k \text{ - м состоянии,} \\ \quad \text{обеспечивает связность вершин } a_i \text{ и } a_j; \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В результате функционал (6) определяется выражениями:

$$\hat{p}_{\text{отк}}^{(R,L)} = 1 - \sum_{k=1}^{2^{\kappa}} Q_{RL}^{(k)} \cdot p_k = 1 - \sum_{k=1}^{2^{\kappa}} Q_{RL}^{(k)} \cdot \Big(\prod_{\varphi=1}^{\kappa} p_{\varphi}^{\sigma_{\varphi}} \cdot q_{\varphi}^{1-\sigma_{\varphi}} \Big); R, L = \overline{1, S}; \tag{15}$$

$$\hat{P}_{\text{отк}} = 1 - \sum_{k=1}^{2^{\kappa}} Q_o^{(k)} \cdot p_k = 1 - \sum_{k=1}^{2^{\kappa}} Q_o^{(k)} \prod_{\varphi=1}^{\kappa} p_{\varphi}^{\sigma_{\varphi}} \cdot q_{\varphi}^{1-\sigma_{\varphi}}. \tag{16}$$

Таким образом, методика математического моделирования функционирования МСС состоит в решении следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned}
& P_{\varepsilon(L)}^{(ROUT)} = \left\| P_{\varepsilon(L)i}^{(ROUT)j} \right\|_{S,S} i, j = \overline{1, S}; \\
& \lambda_{\text{o}\,i}^{(ROUT)j} = \sum_{L=1}^{S} \sum_{\varepsilon=1}^{\text{E}} \lambda_{\varepsilon} \cdot \pi_{\varepsilon,i,j} \cdot p_{\varepsilon(L)i}^{(ROUT)j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j; \\
& p_{\text{отк}\ i}^{(ROUT)j} = \int_{x_{\text{отк}}}^{\infty} \left[\frac{\lambda_{\text{o}\,i}^{(ROUT)H_{\max} j} \cdot x^{H_{\max}-1} \cdot e^{-\lambda_{\text{o}\,i}^{(ROUT)j \cdot x}}}{\int_0^{\infty} x^{H_{\max}-1} \cdot e^{-x} dx} - \mu_{ij} e^{-\mu_{ij} \cdot x} \right] dx; i, j = \overline{1, S}; i \neq j; \\
& P_{\text{над}\ i}^{j} = (1 - p_{\text{отк}\ i}^{(ROUT)j}) \cdot (1 - p_{\text{дес}\ i}^{j}); i, j = \overline{1, S; i \neq j}; \qquad (17) \\
& \hat{p}_{\text{отк}}^{(R,L)} = 1 - \sum_{k=1}^{2^{\kappa}} Q_{RL}^{(k)} \cdot p_k = 1 - \sum_{k=1}^{2^{\kappa}} Q_{RL}^{(k)} \cdot \Big(\prod_{\varphi=1}^{\kappa} p_{\varphi}^{\sigma_{\varphi}} \cdot q_{\varphi}^{1-\sigma_{\varphi}} \Big); R, L = \overline{1, S}; \\
& \hat{P}_{\text{отк}} = 1 - \sum_{k=1}^{2^{\kappa}} Q_o^{(k)} \cdot p_k = 1 - \sum_{k=1}^{2^{\kappa}} Q_o^{(k)} \prod_{\varphi=1}^{\kappa} p_{\varphi}^{\sigma_{\varphi}} \cdot q_{\varphi}^{1-\sigma_{\varphi}}.
\end{aligned} \right.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков, С. Н. Методы маршрутизации на цифровых широкополосных сетях связи: учеб. пособие по специальности 200900. – Сети связи и системы коммутации / С. Н. Новиков. – Новосибирск: СибГУТИ. – Ч. 1.– 2001. – 83 с.

2. Агеев, Д. В. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом самоподобия [Электронный ресурс] / Д. В. Агеев, А. А. Игнатенко, А. Н. Копылев // Проблемы телекоммуникаций : электрон. науч. специализир. изд.–журнал. – 2011. – № 5. – С. 16–37. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua.

3. Пономарев, Д. Ю. Исследование моделей потоков вызовов [Электронный ресурс] / Д. Ю. Пономарев. – Режим доступа: http://www.nsc.ru/ws/YM2004/ 8509/index.html.

4. Новиков, С. Н. Методы оценки структурной надежности телекоммуникационных систем : учеб. пособие : метод. комплекс / С. Н. Новиков, Е. В. Сафонов. – Новосибирск, 2004. – 44 с.