

УДК 621.396

Н.В. Рвачёва

*Военный институт телекоммуникаций и информатизации НТУУ «КПИ», Полтава*

## МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОСТУПНОЙ ДЛЯ ТРАФИКА ДАННЫХ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

*Предложена методика моделирования доступной для трафика данных пропускной способности телекоммуникационной сети, основанная на экспоненциальном распределении моментов начала передачи и длительности передачи потоков реального времени. С использованием системы MATLAB+Simulink разработана модель, имитирующая процесс передачи потоков реального времени и трафика данных в телекоммуникационной сети. Адекватность модели доказана путем сравнения результатов аналитического и имитационного моделирования. Предложенная методика может применяться для корректного моделирования процессов динамического изменения пропускной способности сети.*

**Ключевые слова:** имитационная модель, доступная пропускная способность, трафик.

### Обоснование актуальности исследований и анализ литературы

Информационные сообщения, передаваемые в современных телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов, образуют мультимедийный трафик (речевые сообщения, видео) и трафик данных (сигналы управления, текстовые сообщения, различные изображения, другая графическая и табличная информация). Интенсивность передачи информации, инициированной работой в реальном времени какого-либо мультимедийного приложения, достаточно высока и близка к постоянному значению, поэтому такой вид трафика часто именуют потоковым трафиком или трафиком реального времени [1 – 3]. Для качественной передачи потокового трафика необходимо минимизировать задержку пакетов и ее дисперсию (джиттер), что требует гарантированного выделения соответствующей пропускной способности сети [4]. Идея, которая состоит в резервировании пропускной способности сети при передаче мультимедийных потоков, нашла применение в технологиях интегрированного обслуживания *IntServ (Integrated Services)* [5] и дифференцированного обслуживания *DiffServ (Differentiated Services)* [6].

Задержки отдельных пакетов на качество передачи данных практически не влияют. Поэтому терпимые к пакетным задержкам потоки данных классифицируют как трафик, для передачи которого можно использовать сетевые ресурсы, оставшиеся после выделения требуемой доли пропускной способности сети более приоритетному трафику реального времени. Чтобы повысить оперативность доставки в сети сообщений, образующих потоки данных, необходимо рационально использовать доступную для соответствующего трафика пропускную способность. Для достижения этой цели в телекоммуникационной сети требуется осуществлять управ-

ление интенсивностью потоков данных, идея которого состоит в том, чтобы обеспечить соответствие между интенсивностью передачи пакетов данных и величиной доступной в текущий момент времени пропускной способности сети [7 – 10].

Изменение во времени текущих значений величины доступной для трафика данных пропускной способности сети представляет собой случайный процесс  $P(t)$ , реализации которого во многом определяются параметрами передаваемых по сети потоков реального времени. При разработке методов управления интенсивностью потоков данных в телекоммуникационной сети и оценке эффективности этого управления возникает необходимость в применении математических моделей, позволяющих получить корректные реализации случайного процесса  $P(t)$ .

Известны работы, например [11, 12], в которых величина доступной для трафика данных пропускной способности сети задается произвольно, по усмотрению исследователей. При этом наиболее упрощенные модели представляют функцию  $P(t)$  в виде:

1) заданного фиксированного значения:

$$P(t) = p = \text{const}, \quad 0 < p < C,$$

где  $C$  – предельное значение пропускной способности сети, определяемое характеристиками физических каналов;

2) произвольного скачка:

$$P(t) = \begin{cases} p_1 \in (0, C), & t \in [0, t_1); \\ p_2 \in (0, C), & t \in (t_1, \infty). \end{cases}$$

Такие модели являются слишком грубыми и не соответствуют реальности.

В научном труде [13] приводится теоретическое обоснование среднего значения  $P_{\text{ср}}$  пропуск-

ной способности сети, доступной для определенного класса трафика:

$$P_{cp} = f(\bar{\psi}),$$

где  $\bar{\psi}$  – вектор параметров, которые характеризуют процесс передачи информационных потоков в сети и не зависят от времени.

К сожалению, наличие подобных зависимостей не является достаточным для получения корректных текущих значений  $P(t)$ .

Значения, являющиеся наиболее близкими к реальным значениям доступной пропускной способности, получены в работе [14]. При этом с помощью анализатора протоколов выполнялись измерения трафика, передаваемого по каналу существующей сети. В результате таких экспериментов получены адекватные реализации доступной пропускной способности в одном из каналов сети. Однако определение подобным образом доступной пропускной способности в рамках целого маршрута, т.е. последовательного соединения многочисленных каналов, сопряжено со значительными трудностями.

Поэтому **актуальной** представляется научная задача, состоящая в разработке методики создания адекватных моделей, имитирующих изменение во времени величины пропускной способности сети, доступной для передачи потоков данных.

**Целью статьи** является получение с помощью математического моделирования корректных текущих значений величины доступной для трафика данных пропускной способности телекоммуникационной сети.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие взаимосвязанные частные задачи исследования:

- 1) разработать методику моделирования доступной для трафика данных пропускной способности телекоммуникационной сети;
- 2) создать имитационную модель, реализующую указанную выше методику;
- 3) обосновать адекватность имитационной модели, созданной с использованием предлагаемой методики.

## **1. Разработка методики моделирования доступной для трафика данных пропускной способности телекоммуникационной сети**

Известно, что интенсивность передачи информации по заданному маршруту не может превышать пропускную способность самого «медленного» участка в рамках этого маршрута [15]. Доступная для передачи данных пропускная способность каждого отдельно взятого участка (канала) сети определяется, во-первых, известными значениями его техниче-

ских характеристик, во-вторых, величиной его загрузки, которая случайным образом изменяется во времени. Мгновенное значение используемой пропускной способности канала определяется суммарной интенсивностью передаваемых по нему в текущий момент времени потоков. Каждому потоку соответствуют значения двух случайных величин: момента времени начала передачи и длительности передачи. Для моделирования передаваемых по каналу потоков необходимо обосновать законы распределения этих величин.

В рамках теории массового обслуживания предложены модели, адекватно описывающие функционирование узла коммутации телефонных каналов, на который поступает поток запросов на установление соединения [16, 17]. Наиболее распространенная модель входящих в такую систему вызовов, предполагает, что функция распределения интервала времени между их поступлением, а также функция распределения длительности их обслуживания подчиняются экспоненциальному закону. Практическая важность такой модели обусловлена тем, что вычисленные на ее основе значения основных характеристик системы массового обслуживания хорошо согласуются с результатами соответствующих измерений в реально функционирующих сетях с коммутацией каналов.

Между двумя процессами – обслуживанием вызова в традиционной телефонной сети связи и передачей потока реального времени в телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов – очевидна аналогия. Несомненное сходство этих процессов заключается в том, что моменты их начала и окончания инициируются исключительно пользователями и связаны только с их субъективными потребностями, а не с технологическими особенностями передачи информации в той или иной сети. Поэтому обоснованным представляется допущение о том, что плотность распределения временного интервала между моментами начала передачи потоков реального времени, а также плотность распределения длительности их передачи соответствуют экспоненциальному закону.

*Постановка задачи*

*Заданы:*

1) последовательность физических каналов  $K = \{k_i\}$ ,  $i = \overline{1, I}$  телекоммуникационной сети, по которой от узла  $A_1$  к узлу  $A_2$  требуется передавать поток данных  $v$ ;

2) множество потоков реального времени  $\Omega = \{\omega_{ij}\}$ , где  $\omega_{ij}$  – поток номер  $j$ ,  $j = \overline{1, J}$ , который требуется передавать по каналу  $k_i$ ;

3) множество  $C = \{c_i\}$ , где  $c_i$  – значение про-

пускной способности канала  $k_i$ ;

4) множество  $\Lambda = \{\lambda_{ij}\}$ , где  $\lambda_{ij}$  – требуемое значение интенсивности передачи потока  $\omega_{ij}$ ;

5) множество  $X_1 = \{x_{i1}\}$ , где  $x_{i1}$  – значение момента времени, соответствующего началу передачи потока  $\omega_{i1}$ ;

6) интервал времени моделирования  $\Theta = [0; t_{\text{кон}}]$ .

*Необходимо:* определить значения пропускной способности  $P(t)$ , которая будет доступна для передачи потока  $v$  в каждый текущий момент времени  $t \in \Theta$ .

*Ограничения:*

1) в течение интервала времени  $\Theta$  поток  $v$  может передаваться только по одному и тому же маршруту, определяемому заданной последовательностью каналов  $K$ ;

2) в течение интервала времени  $\Theta$  ни один канал из множества  $K$  не может быть использован для передачи других потоков данных.

*Допущения:*

1) интервал времени между соседними моментами начала передачи потоков реального времени по каналу  $k_i$  является случайной величиной  $S_i$ , которая распределена по экспоненциальному закону и характеризуется математическим ожиданием  $\bar{S}_i$ ;

2) длительность передачи потока реального времени по каналу  $k_i$  является случайной величиной  $T_i$ , характеризующейся экспоненциальным законом распределения и математическим ожиданием  $\bar{T}_i$ .

Задача получения значений, которые принимает в текущий момент времени  $t$  величина доступной для передачи потока  $v$  пропускной способности телекоммуникационной сети, сводится к определению минимального элемента множества  $\{p_i(t)\}$ :

$$P(t) = \min \{p_i(t)\}, \quad (1)$$

где  $p_i(t)$  – значение доступной для передачи потока  $v$  пропускной способности канала  $k_i$  в момент времени  $t$ .

Для решения поставленной задачи необходимо вычислить значения каждого элемента  $p_i(t)$  по формуле:

$$p_i(t) = c_i - L_i(t), \quad (2)$$

где  $L_i(t)$  – значение суммарной интенсивности потоков реального времени, передаваемых по каналу  $k_i$  в момент времени  $t$ .

При определении величины  $L_i(t)$  необходимо учитывать, что суммарная интенсивность одновременно передаваемых по одному и тому же каналу потоков не может превышать пропускную способность этого канала. Передача потока  $\omega_{ij}$  в момент времени  $t$  возможна лишь при выполнении условия:

$$m_{ij}(t) \leq c_i, \quad (3)$$

где  $m_{ij}(t)$  – значение суммарной интенсивности потоков реального времени, которые требуется передавать по каналу  $k_i$  в момент времени  $t$ .

Значение  $m_{ij}(t)$  определяется из выражения:

$$m_{ij}(t) = \begin{cases} l_{i1}(t), & j=1; \\ m_{i(j-1)}(t) + l_{ij}(t), & 2 \leq j \leq J, \end{cases} \quad (4)$$

где  $l_{ij}(t)$  – требуемое значение интенсивности передачи потока  $\omega_{ij}$  в момент времени  $t$ .

Определив по формуле (4) множество  $\{m_{ij}(t)\}$ , можно найти искомую величину  $L_i(t)$  как удовлетворяющее условию (3) наибольшее значение суммарной интенсивности потоков реального времени, которые требуется передавать по каналу  $k_i$  в момент времени  $t$ :

$$L_i(t) = \max \{m_{ij}(t)\}, \quad m_{ij}(t) \leq c_i.$$

В формуле (4) неизвестными являются значения  $l_{ij}(t)$ . Если в момент времени  $t$  требуется передавать поток  $\omega_{ij}$ , то требуемое значение интенсивности его передачи в этот момент времени будет соответствовать заданному значению  $\lambda_{ij}$ , в противном случае – будет нулевой:

$$l_{ij}(t) = \begin{cases} \lambda_{ij}, & \text{если } t \in [x_{ij}; x_{ij} + \tau_{ij}]; \\ 0, & \text{если } t \notin [x_{ij}; x_{ij} + \tau_{ij}], \end{cases} \quad (5)$$

где  $x_{ij}$  – значение момента времени, в который требуется начать передачу потока  $\omega_{ij}$ ;  $\tau_{ij}$  – требуемое значение длительности передачи потока  $\omega_{ij}$ .

Согласно сделанным допущениям, известно, что случайная величина  $T$  распределена по экспоненциальному закону. Поэтому плотность распределения требуемой длительности передачи потока из множества  $\Omega$  может быть представлена в виде функции:

$$g(t) = \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Для получения значений какой-либо случайной величины в процессе моделирования используют специальные датчики, которые, как правило, гене-

рируют значения случайной величины, имеющей равномерное распределение в интервале (0, 1). В реальности такие датчики генерируют не случайные, а достаточно близкие к ним псевдослучайные числа. Имея последовательность равномерно распределенных случайных чисел  $\{U_n\}$ ,  $n = \overline{1, N}$ , можно вычислить значения случайных чисел  $\{Y_n\}$  с экспоненциальным распределением и средним значением  $\alpha$  по формуле [18]:

$$Y_n = -\alpha \ln(1 - U_n).$$

Поэтому, используя для каждого канала  $k_i$  отдельный датчик, генерирующий равномерно распределенные значения случайных чисел  $\{U_{ij}\}$ , можно получить значения  $\{\tau_{ij}\}$  случайной величины  $T$ :

$$\tau_{ij} = -T \ln(1 - U_{ij}). \quad (6)$$

В формуле (5) неизвестным является множество значений  $X = \{x_{ij}\}$ . Элементы этого множества можно последовательно найти, используя выражение:

$$x_{ij} = \begin{cases} x_{i1}, & j=1; \\ x_{i(j-1)} + s_{i(j-1)}, & 2 \leq j \leq J, \end{cases} \quad (7)$$

где  $s_{i(j-1)}$  – продолжительность интервала между моментами времени  $x_{i(j-1)}$  и  $x_{ij}$ .

В качестве примера на рис. 1 иллюстрируются моменты начала передачи потоков реального времени, интервалы между ними и значения длительности передачи этих потоков по каналу  $k_i$ .

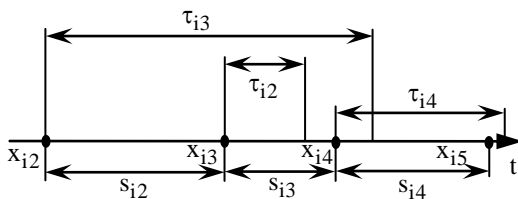


Рис. 1. Моменты начала передачи потоков реального времени, интервалы между ними и значения длительности передачи этих потоков по каналу  $k_i$

Для решения поставленной задачи остается получить множество значений  $\{s_{ij}\}$ . Известно, что плотность распределения случайной величины  $S$ , соответствующая экспоненциальному закону, имеет вид:

$$f(t) = \frac{1}{S} e^{-\frac{t}{S}}.$$

Поэтому для определения значений  $\{s_{ij}\}$  случайной величины  $S$  можно воспользоваться выражением:

$$s_{ij} = -\bar{S} \ln(1 - U_{ij}). \quad (8)$$

Методика моделирования доступной для трафика данных пропускной способности телекоммуникационной сети, блок-схема алгоритма реализации которой представлена на рис. 2, включает следующие этапы.

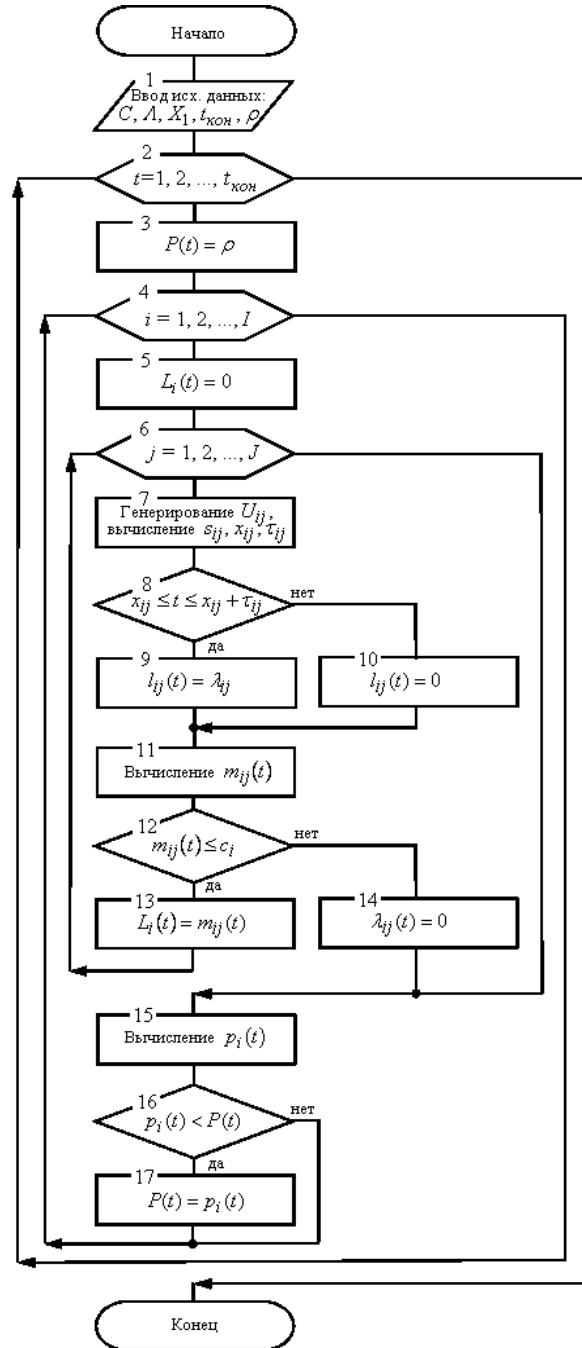


Рис. 2. Блок-схема алгоритма, реализующего методику моделирования доступной для трафика данных пропускной способности сети

1. Ввод исходных данных (блок 1). Вводятся заданные множества значений  $C = \{c_i\}$ ,  $\Lambda = \{\lambda_{ij}\}$ ,  $X_1 = \{x_{i1}\}$ , значение  $t_{\text{кон}}$ , а также значение  $\rho$  заданное большее максимального значения множества  $C$ .

2. *Формирование заявок на передачу потоков реального времени по каналам К*. На этом этапе (блок 7) осуществляется генерирование чисел  $\{U_{ij}\}$  и последовательное вычисление значений  $s_{ij}$  по формуле (8),  $x_{ij}$  по формуле (7) и  $\tau_{ij}$  по формуле (6). В результате каждой заявке на передачу потока  $\omega_{ij}$  ставится в соответствие не только заданная информация о требуемой интенсивности передачи  $\lambda_{ij}$  этого потока, но и полученные значения требуемого момента времени начала его передачи  $x_{ij}$  и требуемой длительности его передачи  $\tau_{ij}$ .

3. *Получение требуемых значений интенсивности передачи потоков реального времени в каждом канале множества К в текущий момент времени t*. На данном этапе с использованием выражения (5) вычисляются значения  $I_{ij}(t)$  (блоки 8 – 10).

4. *Вычисление значений суммарной интенсивности потоков реального времени, которые требуется передавать в каждом из каналов множества К в момент времени t*. Суть этого этапа заключается в получении с помощью выражения (4) значений  $m_{ij}(t)$  (блок 11).

5. *Определение суммарной интенсивности передаваемых потоков реального времени в каждом канале множества К в текущий момент времени t*. В блоке 12 проверяется выполнение условия (3). Если данное условие выполняется, то обновляются значения величин  $L_i(t)$  (блок 13), которые первоначально были приравнены к нулю (блок 5). Невыполнение условия (3) соответствует ситуации, когда ввиду предельной загруженности канала  $k_i$  заявка на передачу потока  $\omega_{ij}$ , поступившая в момент времени  $t$ , получает отказ. При этом обнуляется требуемое значение интенсивности передачи потока  $\omega_{ij}$  (блок 14) и осуществляется переход к следующему этапу методики.

6. *Вычисление значений доступной для передачи потока данных пропускной способности каждого из каналов множества К в текущий момент времени t*. На этом этапе по формуле (2) осуществляется получение значений  $p_i(t)$  (блок 15).

7. *Определение значений, которые принимает в текущий момент времени t величина доступной для передачи потока данных пропускной способности телекоммуникационной сети*. Заключительный этап, в ходе которого из множества полученных значений  $\{p_i(t)\}$  выбирается минимальный элемент. Для этого величине  $P(t)$  присваивается начальное заведомо большое значение  $\rho$  (блок 3). Потом зна-

чение  $P(t)$  поочередно сравнивается с каждым значением множества  $\{p_i(t)\}$ , т.е. для каждого  $i$  проверяется выполнение условия  $p_i(t) < P(t)$  (блок 16). Если после очередной проверки данное условие выполняется, то значение величины  $P(t)$  обновляется и становится равным наименьшему элементу  $p_i(t)$  из проверенного ряда значений (блок 17). В результате прямого перебора всех значений  $\{p_i(t)\}$  определяется искомое значение доступной для трафика данных пропускной способности сети в текущий момент времени.

Этапы 3 – 7 методики циклически повторяются с целью получения результирующих значений  $P(t)$  для каждого момента времени.

## 2. Применение разработанной методики

Предложенная методика нашла применение при разработке модели, имитирующей процесс передачи потоков реального времени и трафика данных в телекоммуникационной сети.

Модель построена в предположении, что для передачи потока данных  $v$  заданной интенсивности  $\lambda_v$  из узла-источника  $A_1$  в узел-приемник  $A_2$  назначен маршрут, который проходит через маршрутизаторы  $M_1$  и  $M_2$ . Передача потока  $v$  осуществляется по каналам  $k_1$  и  $k_2$ . Для буферизации пакетов, ожидающих передачу по каналу  $k_1$ , маршрутизатор  $M_1$  оснащен памятью объемом  $V_1$ , а для буферизации пакетов, ожидающих передачу по каналу  $k_2$ , маршрутизатор  $M_2$  оснащен памятью объемом  $V_2$ . Интенсивность любого передаваемого потока реального времени, принадлежащего множеству  $\Omega$ , равна  $\lambda$ .

Значения параметров, которым соответствует разработанная модель, приводятся в табл. 1.

Таблица 1  
Значения параметров модели

| Параметры   | Значения   | Параметры   | Значения |
|-------------|------------|-------------|----------|
| $c_1, c_2$  | 1 Мбит/с   | $\bar{S}_1$ | 4 с      |
| $\lambda_v$ | 0,4 Мбит/с | $\bar{S}_2$ | 4,9 с    |
| $\lambda$   | 0,1 Мбит/с | $\bar{T}_1$ | 20 с     |
| $V_1, V_2$  | 0,8 Мбит   | $\bar{T}_2$ | 40 с     |

Для моделирования использовалась система MATLAB + Simulink [19]. Структурная схема модели, имитирующей процесс передачи потоков реального времени и трафика данных в телекоммуникационной сети, представлена на рис. 3.

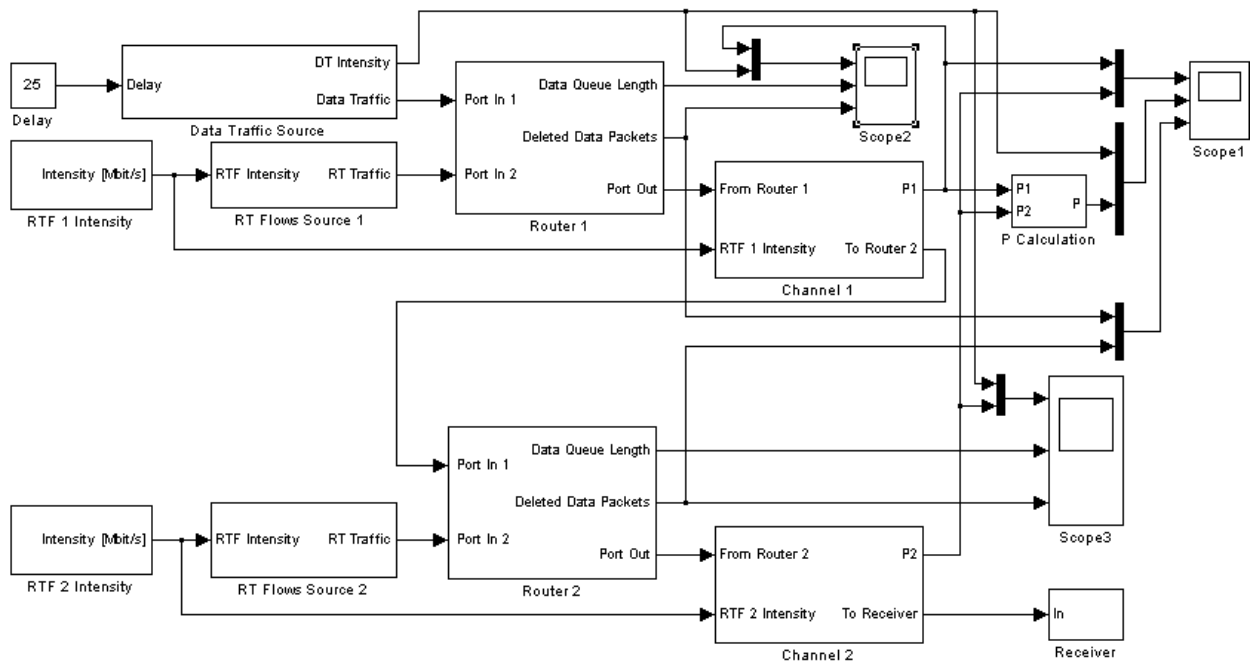


Рис. 3. Структурная схема модели, имитирующей процесс передачи потоков реального времени и трафика данных в телекоммуникационной сети

Элементы данной модели имитируют:

*Data Traffic Source* – отправку узлом-источником  $A_1$  в сеть пакетов данных (период отправки пакетов задается с помощью элемента *Delay*);

*RT Flows Source 1* – отправку пакетов, образующих потоки реального времени  $\{\omega_{1j}\}$ , которые требуется передавать по каналу  $k_1$  (интенсивность отправки этих пакетов моделируется с помощью элемента *RTF 1 Intensity*);

*Router 1* – поступление пакетов в маршрутизатор 1, их буферизацию в соответствии с принадлежностью к тому или иному классу трафика, отбрасывание пакетов в случае максимального заполнения соответствующей канальной очереди, передачу очередного пакета в канал  $k_1$  для отправки в маршрутизатор 2;

*Channel 1* – передачу пакетов по каналу  $k_1$ , вычисление по формуле (2) текущего значения  $p_1(t)$ ;

*RT Flows Source 2* – отправку пакетов, образующих потоки реального времени  $\{\omega_{2j}\}$ , которые требуется передавать в сети по каналу  $k_2$  (интенсивность отправки этих пакетов моделируется с помощью элемента *RTF 2 Intensity*);

*Router 2* – поступление пакетов в маршрутизатор 2, их буферизацию в соответствии с принадлежностью к тому или иному классу трафика, отбрасывание пакетов в случае максимального заполнения соответствующей канальной очереди, передачу очередного пакета в канал  $k_2$  для отправки в узел-приемник  $A_2$ ;

*Channel 2* – передачу пакетов по каналу  $k_2$ , вычисление по формуле (2) текущего значения  $p_1(t)$ ;

*Receiver* – получение узлом-приемником  $A_2$  пакетов данных, отправленных узлом-источником  $A_1$ ;

*P Calculation* – вычисление по формуле (1) текущего значения случайной функции  $P(t)$ .

Виртуальный регистратор *Scope 1* используется для отображения текущих значений случайных функций  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ ,  $p(t)$ , заданного значения  $\lambda_v$ , а также пакетов, отброшенных маршрутизаторами  $M_1$  и  $M_2$ .

С помощью виртуального регистратора *Scope 2* предоставляется возможность визуального наблюдения текущих значений случайной функции  $p_1(t)$ , заданного значения  $\lambda_v$ , текущих значений количества информации, записанной в буферную память  $Q_1$ , а также пакетов, отброшенных маршрутизатором  $M_1$ .

Виртуальный регистратор *Scope 3* используется для отображения текущих значений случайной функции  $p_2(t)$ , заданного значения  $\lambda_v$ , текущих значений количества информации, записанной в буферную память  $Q_2$ , а также пакетов, отброшенных маршрутизатором  $M_2$ .

Как видно, с помощью элементов *Channel 1* и *Channel 2* реализуется выполнение этапа 6, а с помощью элемента *P Calculation* – этапа 7 разработанной методики.

Все указанные выше элементы модели созданы с использованием стандартных блоков библиотеки *Simulink Library Browser*. К сожалению, ограничен-

ный объем статьи не позволяет детально изложить структуру всех элементов модели. Рассмотрим лишь построение элемента *RTF 1 Intensity*, имитирующего выполнение этапов 2 – 5 предложенной методики.

Структурная схема элемента *RTF 1 Intensity* приводится на рис. 4. С помощью элемента *Exp Delay* осуществляется генерирование чисел

$\{U_{1j}\}$  и вычисление значений  $\{s_{1j}\}$  по формуле (8). Элемент *Requests Forming* имитирует формирование заявок на передачу потоков реального времени по каналу  $k_1$  в моменты времени  $\{x_{1j}\}$ , вычисляемые по формуле (7).

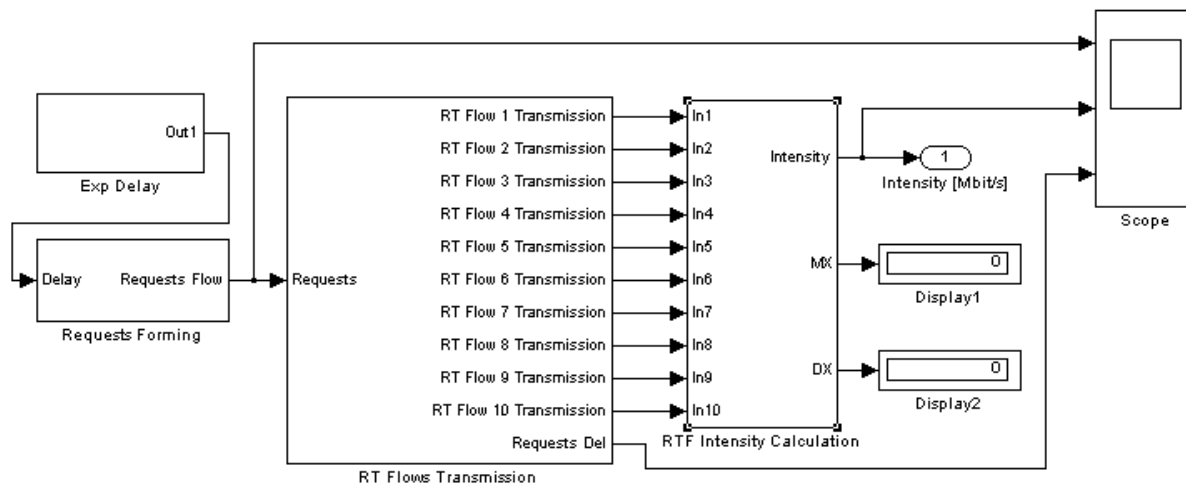


Рис. 4. Структурная схема элемента *RTF 1 Intensity*

Эти заявки в виде коротких единичных импульсов поступают на вход элемента *RTF Flow Transmission*, в котором с использованием формул (3) – (6) определяется, возможна ли передача по сети потока  $\omega_{1j}$  в случае поступления в момент времени  $x_{1j}$  соответствующей заявки. Если в момент времени  $x_{1j}$  принято решение о передаче потока  $\omega_{1j}$ , то на одном из первых десяти выходов элемента *RTF Flow Transmission* с нулевым уровнем сигнала, начиная с момента времени  $(x_{1j} + 1)$  и заканчивая моментом времени  $(x_{1j} + \tau_{1j})$ , будет установлен единичный уровень сигнала. В противном случае соответствующая заявка в виде короткого единичного импульса поступает на 11-й выход (*Requests Del*) данного элемента, т.е. получает отказ.

Элемент *RTF Intensity Calculation* используется для имитации вычисления значений, которые принимает функция  $L_1(t)$  в текущие моменты времени. При этом выполняется сложение сигналов, поступающих на входы данного элемента, и умножение полученного результата на коэффициент, используемый для пересчета количества потоков реального времени в значение интенсивности суммарного трафика, измеряемого в Мбит/с.

Кроме того, для обоснования адекватности модели предусмотрено, что с помощью элемента *RTF Intensity Calculation* вычисляются математическое ожидание и дисперсия случайной функции  $L_1(t)$ , значения которых отображаются виртуаль-

ными регистраторами *Display 1* и *Display 2* соответственно.

Виртуальный регистратор *Scope* используется для отображения поступающих заявок на передачу потоков  $\{\omega_{1j}\}$ , текущих значений суммарной интенсивности передаваемых по каналу  $k_1$  потоков реального времени и заявок, получивших отказ в передаче соответствующих потоков по указанному каналу.

Применяя разработанную модель, можно на выходе элемента *P Calculation* (см. рис. 3) получить искомые текущие значения доступной для трафика данных пропускной способности телекоммуникационной сети. Чтобы доказать, что при использовании данной модели в процессе проведения исследований обеспечивается получение достоверных результатов, необходимо обосновать ее адекватность.

### 3. Обоснование адекватности имитационной модели

Разработанная модель была использована при проведении серии имитационных экспериментов. Результаты одного из этих экспериментов, в качестве примера, иллюстрируются на рис. 5.

На рис. 5, а представлены текущие значения доступной для трафика данных пропускной способности каналов  $k_1$  и  $k_2$ , полученные в результате моделирования.

На интервале  $t \in (0; 31,41]$  (с) значения доступной для трафика данных пропускной способно-

сти канала  $k_1$  не превышают значения соответствующей характеристики канала  $k_2$ , т.е. справедливо

неравенство:  $p_1(t) \leq p_2(t)$ . А при  $t > 31,41$  (с) наблюдается противоположная картина:  $p_2(t) \leq p_1(t)$ .

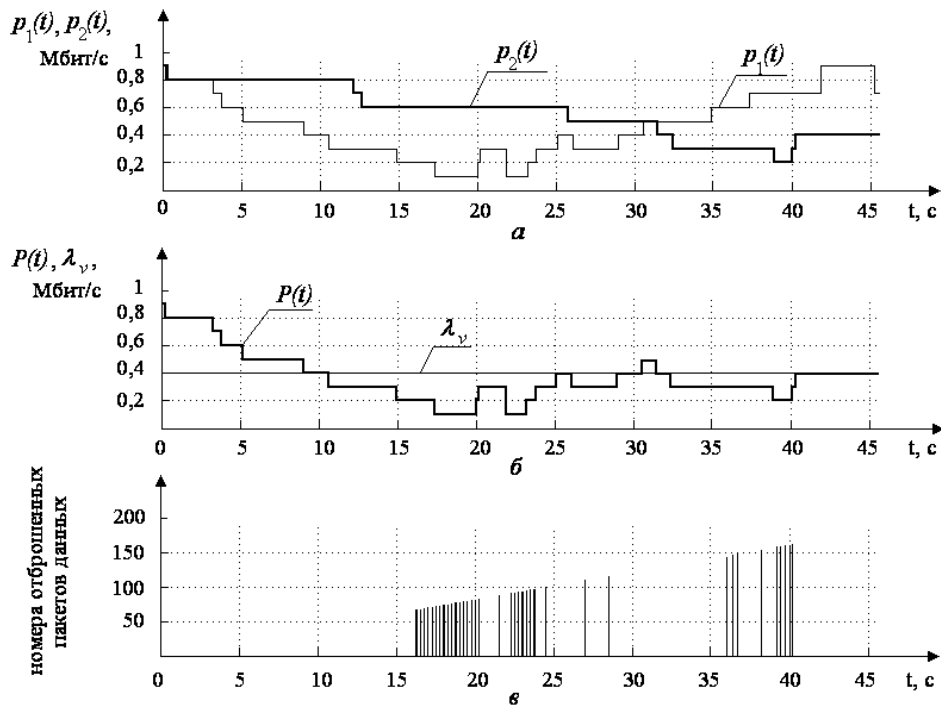


Рис. 5. Осциллограммы виртуального регистратора *Scope 1*

На рис. 5, б изображена ломаная, описывающая изменение текущих значений доступной для трафика данных пропускной способности сети. Как видно, значения  $P(t)$  определены в соответствии с выражением (1): на интервале  $t \in (0; 31,41]$  (с) значения  $P(t)$  совпадают со значениями  $p_1(t)$ , а при  $t > 31,41$  (с) – со значениями  $p_2(t)$ . На этом же рисунке отмечена линия  $\lambda_v$ , соответствующая заданной интенсивности передаваемого потока данных. На интервалах  $t \in [10,59; 25,08]$  (с),  $t \in [26,07; 28,96]$  (с) и  $t \in [32,42; 40,25]$  (с) значение  $\lambda_v$  превышает величину доступной для трафика данных пропускной способности сети. Поэтому на указанных интервалах наблюдаются сетевые перегрузки, факт наличия которых подтверждается вынужденным отбрасыванием маршрутизаторами пакетов, что иллюстрируется осциллограммой, приведенной на рис. 5, в.

С помощью разработанной модели можно выяснить, какие участки сети были перегружены в тот или иной момент времени. Осциллограмма виртуального регистратора *Scope 2*, изображенная на рис. 6, а, показывает, что интенсивность передаваемого потока данных превышает доступную для этого вида трафика пропускную способность канала  $k_1$  на интервалах времени  $t \in [10,59; 25,08]$  (с) и  $t \in [26,07; 28,96]$  (с). Как видно из рис. 6, б, именно на этих интервалах величина  $Q_1$  – количество данных, ожидающих в буферной памяти маршрутиза-

тора  $M_1$  отправки по каналу  $k_1$  – равна  $V_1$  или близка к этому значению. Это значит, что пакеты, зафиксированные на рис. 6, в, на указанных выше интервалах времени были отброшены маршрутизатором  $M_1$  из-за перегрузок канала  $k_1$ .

Осциллограмма, изображенная на рис. 7, а, показывает, что на интервале времени  $t \in [32,42; 40,25]$  (с) значение  $\lambda_v$  превышает текущие значения  $p_2(t)$ . Из рис. 7, б видно, что на этом временном участке возникла перегрузка. Об этом свидетельствует стремительный рост величины  $Q_2$ , характеризующей длину очереди пакетов, буферизованных в маршрутизаторе  $M_2$  для ожидания отправки по каналу  $k_2$ . Следовательно, зафиксированные на рис. 7 (в) пакеты были отброшены маршрутизатором  $M_2$  из-за перегрузки, наблюдаемой в канале  $k_2$  на указанном интервале времени.

Изложенное выше свидетельствует о том, что корректность моделирования проверена в характерных для исследуемого процесса ситуациях. Установлено, что полученные результаты имитационных экспериментов полностью соответствуют особенностям моделируемого процесса. Например, в тех ситуациях, когда интенсивность входящего потока данных превышает доступную для его передачи пропускную способность соответствующих элементов сети, в ходе моделирования так же, как и в реальности, наблюдается возникновение перегрузок, сопровождаемых ростом канальных очередей и вынужденным отбрасыванием пакетов.



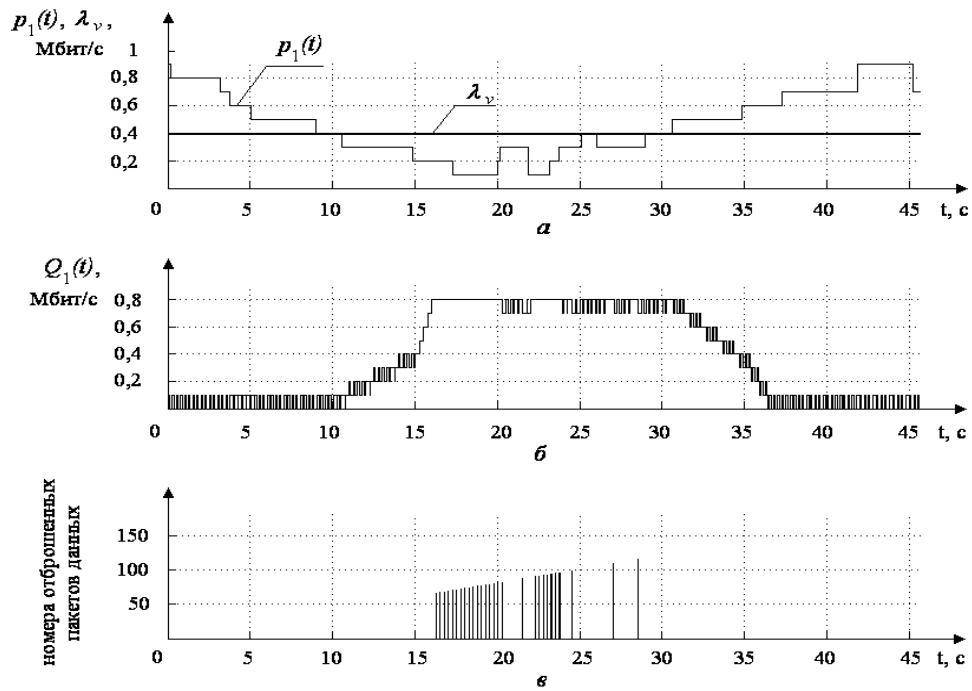


Рис. 6. Осциллограммы виртуального регистратора *Scope 2*

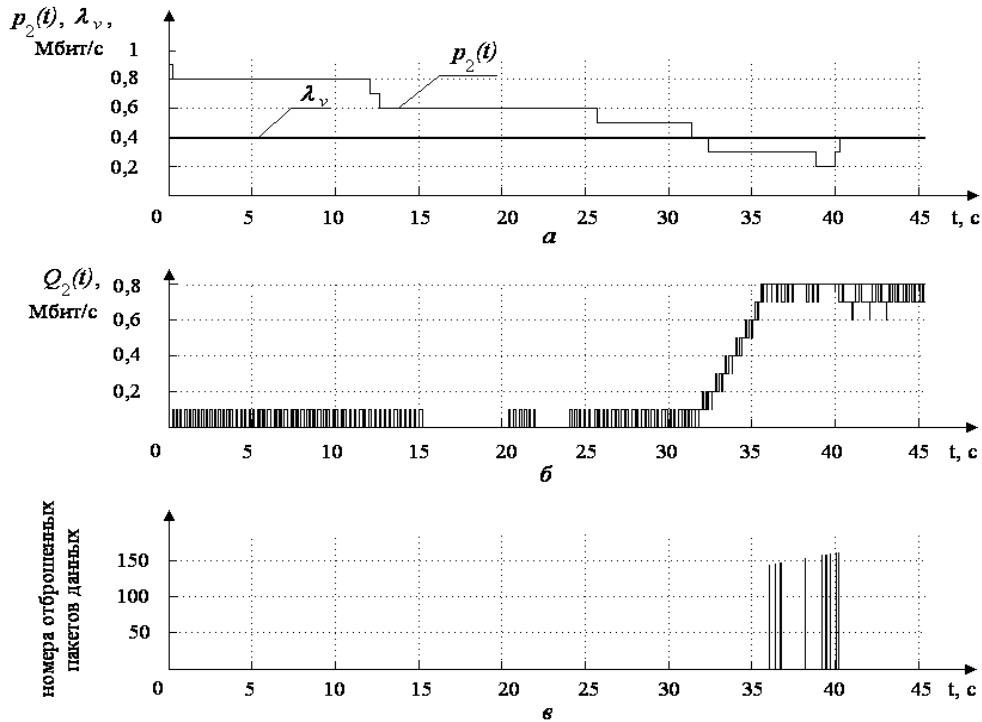


Рис. 7. Осциллограммы виртуального регистратора *Scope 3*

Процесс передачи по одному из каналов сети потоков реального времени, который имитируется с помощью предложенной модели, можно описать в виде графа, представленного на рис. 8.

Вершины данного графа соответствуют состояниям моделируемого процесса.

Например, вершина «2» соответствует одновременной передаче по каналу двух потоков реального времени, а вершина «N» – одновременной передаче по каналу N (максимально возможного количества) потоков реального времени.

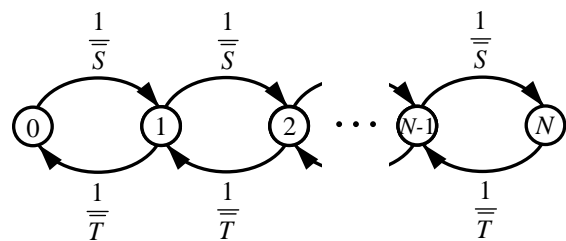


Рис. 8. Граф, моделирующий процесс передачи потоков реального времени в канале телекоммуникационной сети

Ребра рассматриваемого графа показывают возможности переходов из одних состояний моделируемого процесса в другие состояния. Каждому ребру соответствует число, характеризующее интенсивность перехода из одного состояния в другое. Например, переход из состояния «1» в состояние «2» происходит с интенсивностью  $\frac{1}{S}$ , а из состояния «1» в состояние «0» – с интенсивностью  $\frac{1}{T}$ .

Имеющие подобную структуру графы описывают марковский случайный процесс [20], который традиционно применяется для моделирования систем массового обслуживания. Применяя математический аппарат теории вероятности и теории массового обслуживания, можно вычислить характеристики исследуемого процесса. Так, для определения значений вероятности нахождения моделируемого процесса в различных состояниях можно воспользоваться формулой Эрланга:

$$\sigma_n = \frac{\left(\frac{\bar{T}}{S}\right)^n}{n!} \cdot \frac{1}{\sum_{n=0}^N \frac{\left(\frac{\bar{T}}{S}\right)^n}{n!}}, \quad (9)$$

где  $\sigma_n$  – вероятность передачи по каналу одновременно  $n$  потоков реального времени;  $n$  – количество одновременно передаваемых потоков реального времени по каналу сети.

Среднее количество одновременно передаваемых потоков реального времени по каналу сети можно вычислить по формуле:

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^N n \cdot \sigma_n.$$

Дисперсия величины  $n$  вычисляется с помощью выражения:

$$D_n = \sum_{n=0}^N (n - \bar{n})^2 \cdot \sigma_n.$$

В соответствии с данными табл. 1 интенсивности передаваемых по каналу потоков реального времени равны одному и тому же значению  $\lambda$ . В этом случае для определения математического ожидания случайной функции  $L(t)$  можно использовать выражение:

$$\bar{L} = \lambda \cdot \sum_{n=0}^N n \cdot \sigma_n. \quad (10)$$

Для вычисления дисперсии случайной функции  $L(t)$  в указанном случае следует воспользоваться формулой:

$$D_L = \lambda \cdot \sum_{n=0}^N (n - \bar{n})^2 \cdot \sigma_n. \quad (11)$$

Подставив в формулы (9) – (11) значения, представленные в таблице 1, получим  $\bar{L} = 0,491$  (Мбит/с) и  $D_L = 0,444$  (Мбит/с).

Формулы (10) и (11) использованы при построении элемента *RTF Intensity Calculation* разработанной модели (рис. 4). Благодаря этому в процессе имитации процесса передачи по каналу  $k_1$  потоков реального времени обеспечивается вычисление математического ожидания  $\bar{L}_1$  и дисперсии  $D_{L1}$  случайной функции  $L_1(t)$ . В результате выполнения имитационного эксперимента при указанных в таблице 1 исходных данных получены значения  $\bar{L}_1 = 0,5074$  (Мбит/с) и  $D_{L1} = 0,4553$  (Мбит/с). Как видно, в данном случае результаты имитационного моделирования очень незначительно отличаются от результатов аналитического моделирования (не более чем на 3,2%).

В процессе исследований были проведены многочисленные имитационные и расчетные эксперименты с исходными данными, отличающимися от данных, представленных в табл. 1. В результате установлено, что значения величин  $\bar{L}$  и  $D_L$ , полученные в ходе имитационного моделирования, в худшем случае отличаются на 3,9% от значений соответствующих величин, полученных при аналитическом моделировании.

Таким образом, адекватность модели, имитирующей процесс передачи потоков реального времени и трафика данных в телекоммуникационной сети, доказана: контролем результатов вычислений, осуществляемых при имитации исследуемого процесса; проверкой корректности моделирования в характерных для исследуемого процесса ситуациях; сравнением результатов, полученных в ходе имитационного и аналитического моделирования.

Разработанная имитационная модель является подтверждением того, что предложенная в статье методика может успешно применяться для корректного моделирования текущих значений доступной для трафика данных пропускной способности телекоммуникационной сети.

## Выводы

Предложена новая методика моделирования доступной для трафика данных пропускной способности телекоммуникационной сети, которая в отличие от известных методик, основана на экспоненциальном распределении моментов начала передачи и длительности передачи потоков реального времени.

Применение указанной методики позволяет создавать адекватные модели, имитирующие про-

цесс динамического изменения пропускной способности сети, доступной для передачи потоков данных.

## Список литературы

1. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е.А. Кучерявый. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.
2. Куроуз Дж. Компьютерные сети / Дж. Куроуз, К. Росс. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 765 с.
3. Столинс В. Современные компьютерные сети / В. Столинс. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 783 с.
4. Вегенша Ш. Качество обслуживания в сетях IP: пер. с англ. / Ш. Вегенша. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
5. Braden R. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview / R. Braden, D. Clark, S. Shenker // RFC 1633. – 1994.
6. An Architecture for Differentiated Services / S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Vang, W. Weiss // RFC 2475. – 1998.
7. Польщиков К.О. Управління інтенсивністю передавання даних в інформаційних мережах, що здійснюється на транспортному рівні моделі OSI: методи, проблеми та шляхи удосконалення / К.О. Польщиков, Н.В. Рвачова, В.В. Шкіцький // Інформаційні інфраструктури та технології. – Полтава, 2009. – Вип. 1. – С. 55-58.
8. Польщиков К.О. Імітаційна модель управління інтенсивністю вхідного потоку даних в телекомунікаційній мережі / К.О. Польщиков, Н.В. Рвачова // Зб. наук. праць ВІПІ НТУУ «КПІ». – К.: ВІПІ НТУУ «КПІ», 2009. – Вип. 2. – С. 98-109.
9. Польщиков К.О. Імітаційна модель управління потоками даних в інформаційній мережі шляхом зміни міжсегментного інтервалу / К.О. Польщиков, О.О. Лаврут, С.В. Дружинін // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Х.: НАКУ «ХАІ», 2009. – Вип. 7 (41). – С. 304-308.
10. Польщиков К.А. Управление интенсивностью отправки данных в телекоммуникационной сети / К.А. Польщиков, Н.В. Рвачова // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании». – Севастополь: СевНТУ, 2009. – С. 170-172.
11. Alekseev I.V. ARTCP: Efficient Algorithm for Transport Protocol for Packet Switched Networks / I.V. Alekseev, V.A. Sokolov // Proc. of PaCT'2001. Lecture Notes in Computer Science; Ed. V. Malyshekin. – Springer-Verlag, 2001. – Vol. 2127. – P. 159-174.
12. Гуденко С.А. Анализ работы модифицированного протокола TCP в условиях перегрузки сети / С.А. Гуденко // XLIX научная конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: сборник трудов научной конференции. – М.: МФТИ, 2006. – С. 25.
13. Дымарский Я.С. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи / Я.С. Дымарский, Н.П. Крутякова, Г.Г. Яновский. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 384 с.
14. Платов В.В. Исследование самоподобной структуры телетрафика беспроводной сети / В.В. Платов, В.В. Петров // Радиотехнические тетради. – 2004. – № 30. – С. 58-62.
15. Теория сетей связи / [Рогинский В.Н., Харкевич А.Д., Шнепс М.А. и др.]; под ред. В.Н. Рогинского. – М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.
16. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / [Поповський В.В., Сабурова С.О., Олійник В.Ф., Лосев Ю.І., Агеев Д.В. та ін.]; за ред. В.В.Поповського. – Х.: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
17. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ: пер. с англ. / М. Шварц. – М.: Наука, 1992. – Ч. 1. – 336 с.
18. Крылов В.В. Теория телетрафика и ее приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 288 с.
19. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.
20. Венцель Е.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие для вузов / Е.А. Венцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2002. – 383 с.

Поступила в редколлегию 22.12.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаев, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков.

## МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ДОСТУПНОЇ ДЛЯ ТРАФІКУ ДАНИХ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

Н.В. Рвачова

Запропоновано методику моделювання доступної для трафіку даних пропускної спроможності телекомунікаційної мережі, яка заснована на експоненціальному розподілі моментів початку передачі та тривалості передачі потоків реального часу. З використанням системи MATLAB+Simulink розроблено модель, що імітує процес передачі потоків реального часу та трафіку даних в телекомунікаційній мережі. Адекватність моделі доведено шляхом порівняння результатів аналітичного та імітаційного моделювання. Запропоновану методику доцільно використовувати для коректного моделювання процесів динамічної зміни пропускної спроможності мережі.

**Ключові слова:** імітаційна модель, доступна пропускна спроможність, трафік.

## THE METHODOLOGY OF MODELING AVAILABLE FOR DATA TRAFFIC BANDWIDTH TELECOMMUNICATIONS NETWORK

N.V. Rvachova

The methodology of modeling available for data traffic bandwidth telecommunications network, presented in this paper, based on the exponential distribution of moment start transfer and width stream transmission real time. Simulation model of process transmission streams real time and data traffic in telecommunications network, is developed by using MATLAB+Simulink system. Model adequacy proved by comparison analytical and simulated results. This methodology can be used for process modeling dynamic change of network bandwidth

**Keywords:** simulation model, available bandwidth, traffic.