

Модели адаптивного мультиплексирования и алгоритмы диспетчеризации мультисервисного трафика земных станций спутниковой связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки

Models of adaptive multiplexing and algorithms of dispatching of multi-service traffic of land satellite communication systems in the conditions of dynamically changing signal-to-noise ratio

Ковальский / Kovalskiy A.

Александр Александрович

(sake636@mail.ru)

кандидат технических наук.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

старший научный сотрудник военного института.

г. Санкт-Петербург

Афонин / Afonin G.

Глеб Игоревич

(csm@nm.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

начальник лаборатории – старший научный

сотрудник военного института.

г. Санкт-Петербург

Карабельников / Karabelnikov I.

Игорь Анатольевич

(igork1981@yandex.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

начальник отдела военного института.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: мультиплексирование – multiplexing; диспетчеризация – dispatching; мультисервисный трафик – multi-service traffic; земная станция спутниковой связи – land satellite communication system; марковски модулируемый пуассоновский процесс – Markov modulated Poisson process.

Статья посвящена организации адаптивного мультиплексирования и диспетчеризации мультисервисного трафика в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи. Разработаны модели адаптивного мультиплексирования и алгоритмы диспетчеризации мультисервисного трафика с учетом статистических свойств, приоритетов в обслуживании и нестационарности входящих информационных потоков на основе марковски модулируемых пуассоновских процессов. Проведено исследование зависимостей увеличения пропускной способности земных станций спутниковой связи от применения технологии адаптивного мультиплексирования и изменения параметров качества обслуживания мультисервисного трафика в различных условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки.

The article is addressed to organization of adaptive multiplexing and dispatching of multi-service traffic in data-communications equipment of land satellite communication systems. Models of adaptive multiplexing and dispatching of multi-service traffic are developed with account of statistical properties, priorities in maintenance and unsteadiness of incoming information flows based on Markov modulated Poisson processes. Examination of dependencies of capacity increase of land satellite communication systems on application of technologies of adaptive multiplexing and change of maintenance quality parameters of multi-service traffic in different conditions of dynamically changing signal-to-noise ratio is performed.

Введение

Важное место в телекоммуникационной инфраструктуре занимают сети спутниковой связи (ССС). Широкое распространение спутниковой связи обусловлено такими уникальными ее свойствами, как высокая гибкость реконфигурации сетей, возможность оперативной организации связи на обширных пространствах и пересеченной местности, независимость стоимости и качества спутниковых каналов от их протяженности. В настоящее время наблюдается значительный рост объемов передаваемых информационных потоков, а также качественное изменение их структуры. Структура трафика современных мультисервисных сетей включает одновременно передаваемые потоки речевой и видеоинформации, изображений и другой информации. Такие информационные потоки предъявляют существенно различающиеся и все более жесткие требования к качеству обслуживания. Однако ограниченность частотно-временного энергетического ресурса (далее – радиоресурса) космических аппаратов связи (КАС), необходимость учета различных режимов эксплуатации земных станций спутниковой связи (ЗССС) не позволяют достигать необходимого качества предоставляемых услуг только за счет экстенсивного наращивания орбитального ресурса и требуют принятия специальных мер для обеспечения заданной пропускной способности ССС.

Высокие требования по устойчивости функционирования телекоммуникационных систем вступают в противоречие с низкой помехоустойчивостью каналов радиосвязи к внешним помеховым воздействиям. Для обеспечения высокой помехоустойчивости современных радиоканалов связи используются сигналы с различными видами модуляции и помехоустойчивого кодирования с переменной скоростью, схемы применения которых адаптируются к сигнально-помеховой обстановке в интересах достижения максимальной битовой скорости передачи в текущих условиях.

При существующей технологии мультиплексирования трафика в ЗССС выделение радиоресурса происходит под пиковые значения интенсивности информационного потока без учета статистических характеристик мультисервисного трафика, что выражается в недоиспользовании радиоресурса при общем его дефиците. Поэтому особую актуальность приобретает задача обеспечения высокой пропускной способности сетей спутниковой связи при передаче мультисервисного трафика за счет учета его статистических характеристик и дифференциации качества обслуживания разнородных абонентов при мультиплексировании спутниковых радиолиний.

Вопросы управления телекоммуникационными ресурсами для повышения качества обслуживания, а также эффективного распределения ограниченного радиоресурса ССС рассматривались в работах целого ряда отечественных и зарубежных ученых.

Однако большинство работ в этой области не затрагивает вопросы учета статистических особенностей мультисервисного трафика и приоритетов в обслуживании. При этом важную роль для исследования вопросов повышения пропускной способности ССС приобретает задача мультиплексирования мультисервисного трафика в ЗССС с учетом его статистических свойств и приоритетов в обслуживании при ограниченном радиоресурсе КАС. Основными факторами, осложняющими решение данной задачи, являются разнородность структуры трафика, формируемого мультисервисными приложениями, а также необходимость учета колебаний пропускной способности ЗССС при изменении сигнально-помеховой обстановки.

Постановка задачи исследования

В состав каналаобразующей аппаратуры типовой ЗССС входит модемное оборудование с адаптивными режимами работы и мультиплексор с технологией временного мультиплексирования каналов. Режимы работы модемного оборудования могут выбираться адаптивно или назначаться директивно в зависимости от текущих условий. К мультиплексору подключены сети доступа, в состав которых входят оконечные устройства – источники мультисервисного трафика. Мультиплексор формирует стандартные каналы связи, обеспечивая транспорт для передачи мультисервисного трафика, при этом конкретное число каналов зависит от режима работы модемного оборудования ЗССС.

Анализ технических характеристик каналаобразующей аппаратуры типовых ЗССС позволил определить зависимость изменения пропускной способности типовой ЗССС от применения различных конфигураций модемного оборудования в различных режимах работы, что иллюстрирует график на рис. 1. Анализ данного графика показал, что использование помехозащищенных режимов работы модемного оборудования приведет к снижению пропускной способности ЗССС в среднем в 3–4 раза, что составит примерно 25–35 % от максимальной. С другой стороны, информационная нагрузка приоритетных служб и абонентов будет возрастать. Обеспечение функционирования ССС в сложившейся сигнально-помеховой обстановке приведет к необходимости частичного отключения каналов спутниковой связи в соответствии с их классами важности.

Анализ статистических свойств мультисервисного трафика ССС позволил сделать вывод, что загрузка каналов спутниковой связи не превышает в среднем 40% [1, 2]. Данный факт, в первую очередь, связан со спецификой работы телекоммуникационных служб (клиент-серверных приложений, IP-телефонии и других видов диалогового трафика). Наличие длительных временных пауз при использовании каналов различными приложениями позволяет организовать дополнительные каналы (рис. 2), однако при этом не должно

ухудшаться качество передачи информации, особенно приоритетных источников.

Таким образом, возникает противоречие, заключающееся в наличии пауз отдельных источников, которые можно использовать как резерв для организации дополнительных каналов, путем адаптивного мультиплексирования, и необходимостью обеспечению требований по качеству обслуживания приоритетных абонентов. Разрешение данного противоречия требует построения особого класса моделей, которые, с одной стороны, способны учитывать статистические свойства трафика, его разнородность и нестационарность, а с другой – обеспечить требуемое качество обслуживания приоритетных источников. Следует отметить, что существующие методы мультиплексирования мультисервисного трафика в ЗССС не позволяют учесть его статистические характеристики и приоритетность в обслуживании.

В качестве целевого показателя для оценки прироста пропускной способности ЗССС примем коэффициент мультиплексирования каналов связи, организуемых мультиплексором, который показывает отношение числа формируемых логических (виртуальных) каналов связи к числу стандартных физических каналов мультиплексора ЗССС. Данный показатель позволил сформулировать математическую постановку задачи исследования, которая заключается в максимизации целевого показателя, путем разработки соответствующих моделей и алгоритмов при ограничениях по качеству

обслуживания трафика:

$$\rho = \frac{C_N}{C_K} = \frac{N}{K} \rightarrow \max_{\{M_{су}, A_{дп}\}} \left| \begin{array}{l} P_n \leq P_{\text{треб}}; \\ T_3 \leq T_{\text{треб}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где

ρ – коэффициент мультиплексирования каналов связи мультиплексора;

C_N – суммарная пропускная способность виртуальных каналов связи;

C_K – суммарная пропускная способность физических каналов связи;

$C_N = \sum_{i=1}^N C_i$; $C_K = \sum_{i=1}^K C_i$; C_i – пропускная способность i -го канала связи;

$\Delta C = C_N - C_K = N - K$ – выигрыш пропускной способности;

N – число стандартных виртуальных каналов связи;

K – емкость канальной группы мультиплексора;

$M_{су}$ – модели адаптивного мультиплексирования мультисервисного трафика;

$A_{дп}$ – алгоритмы диспетчеризации мультисервисного трафика;

P_n – вероятность потери пакета при адаптивном мультиплексировании;

$P_{\text{треб}}$ – требуемая вероятность потери пакета согласно классу обслуживания;

T_3 – среднее время задержки пакета при адаптивном мультиплексировании;

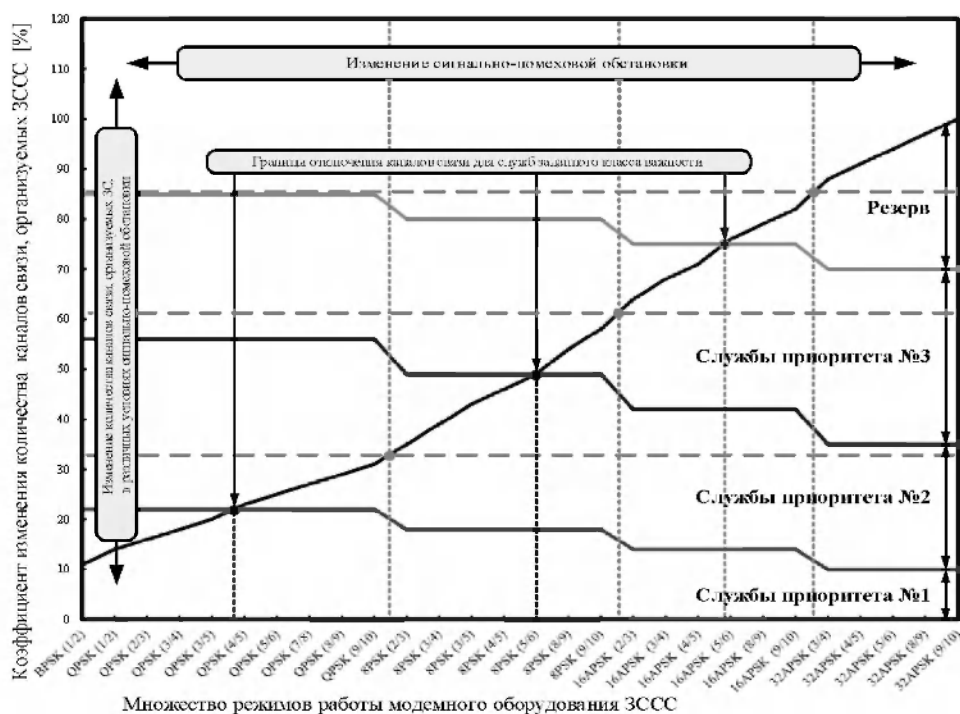


Рис. 1. График изменения количества каналов связи, организуемых ЗССС при изменении сигнально-помеховой обстановки

$T_{\text{треб}}$ – требуемое время задержки пакета согласно классу обслуживания.

Подход к решению задачи

Для исследования параметров трафика при его мультиплексировании разработана модель адаптивного мультиплексирования мультисервисного трафика, которая отличается от известных учетом приоритетов в обслуживании. Данная модель представляет случайный марковский процесс, граф состояний которого представлен на рис. 3 и изображает процесс обслуживания двух разнородных потоков пакетов с высшим (ось x) и низшим (ось y) приоритетами. Каждое состояние процесса характеризуется двумя индексами по числу пакетов соответствующего приоритета, находящихся на обслуживании в мультиплексоре, а переходы между состояниями – поступлением нового пакета, либо завершением его обслуживания. Для обслуживания пакетов мультиплексор распределяет каналный ресурс, максимальная емкость которого K каналов, в случае его недостатка поступающие пакеты помещаются в буфер емкостью B . При переполнении буфера пакеты высшего приоритета вытесняют из буфера пакеты с низшим приоритетом.

Данный подход позволяет конструировать графы случайного марковского процесса различной сложности [3] путем введения дополнительных размерностей в пространстве состояний, что соответствует учету дополнительного количества приоритетов в обслуживании. На рис. 4 представлен граф с учетом

трех приоритетов в обслуживании – высшего, среднего и низшего, принцип работы модели остается тот же. Существенным ограничением данного класса моделей является наличие допущения о том, что потоки пакетов на входе мультиплексора являются стационарными пуассоновскими потоками.

Как показывают исследования реального мультисервисного трафика, его структура существенно отличается от простейшего пуассоновского потока и характеризуется нестационарностью, а также долговременной корреляционной зависимостью – самоподобностью. Одним из конструктивных направлений моделирования таких потоков, в рамках которого имеется возможность получения аналитического решения, является применение марковских моделей пуассоновских процессов (ММП) [4, 5]. Частным случаем таких моделей являются модели прерываемых пуассоновских процессов (ON-OFF модели). Каждый источник при этом имеет следующую структуру. В период активности (ON-периоды) источник генерирует пуассоновский поток пакетов. После периода активности следует пауза (OFF-период), когда источник не генерирует пакеты. Длительности периодов активности и пауз являются случайными величинами, распределенными по экспоненциальному закону. Комбинация нескольких таких ON-OFF источников образует ММП, интенсивность которого изменяется во времени, что позволяет учесть нестационарность реальных входных потоков. На рис. 5 изображен граф марковской цепи, моделирующей процесс передачи трафика от группы абонентов, который описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена:

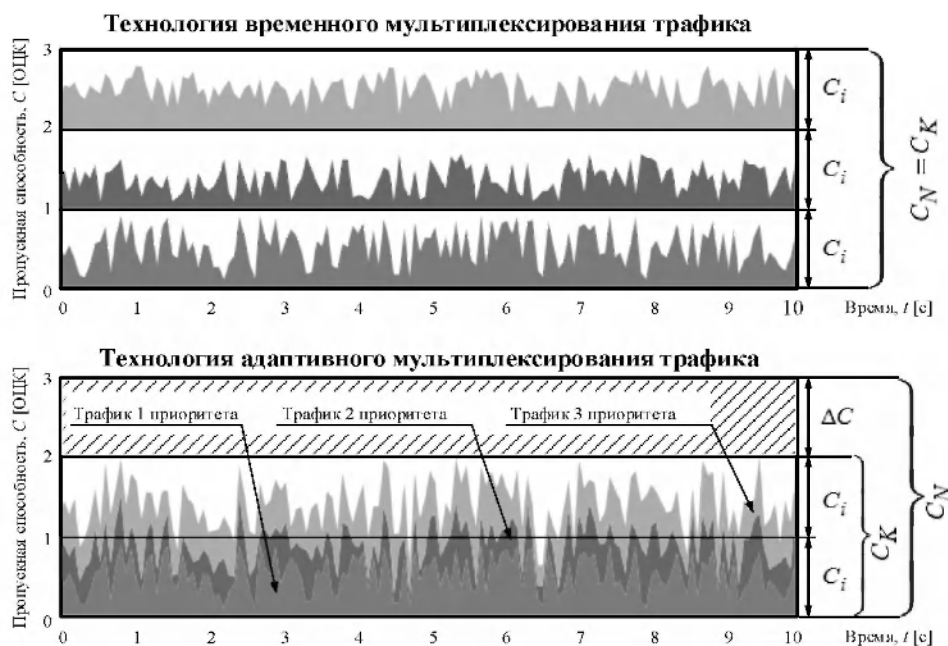


Рис. 2. Сравнение пропускной способности ЗССС при различных технологиях мультиплексирования трафика

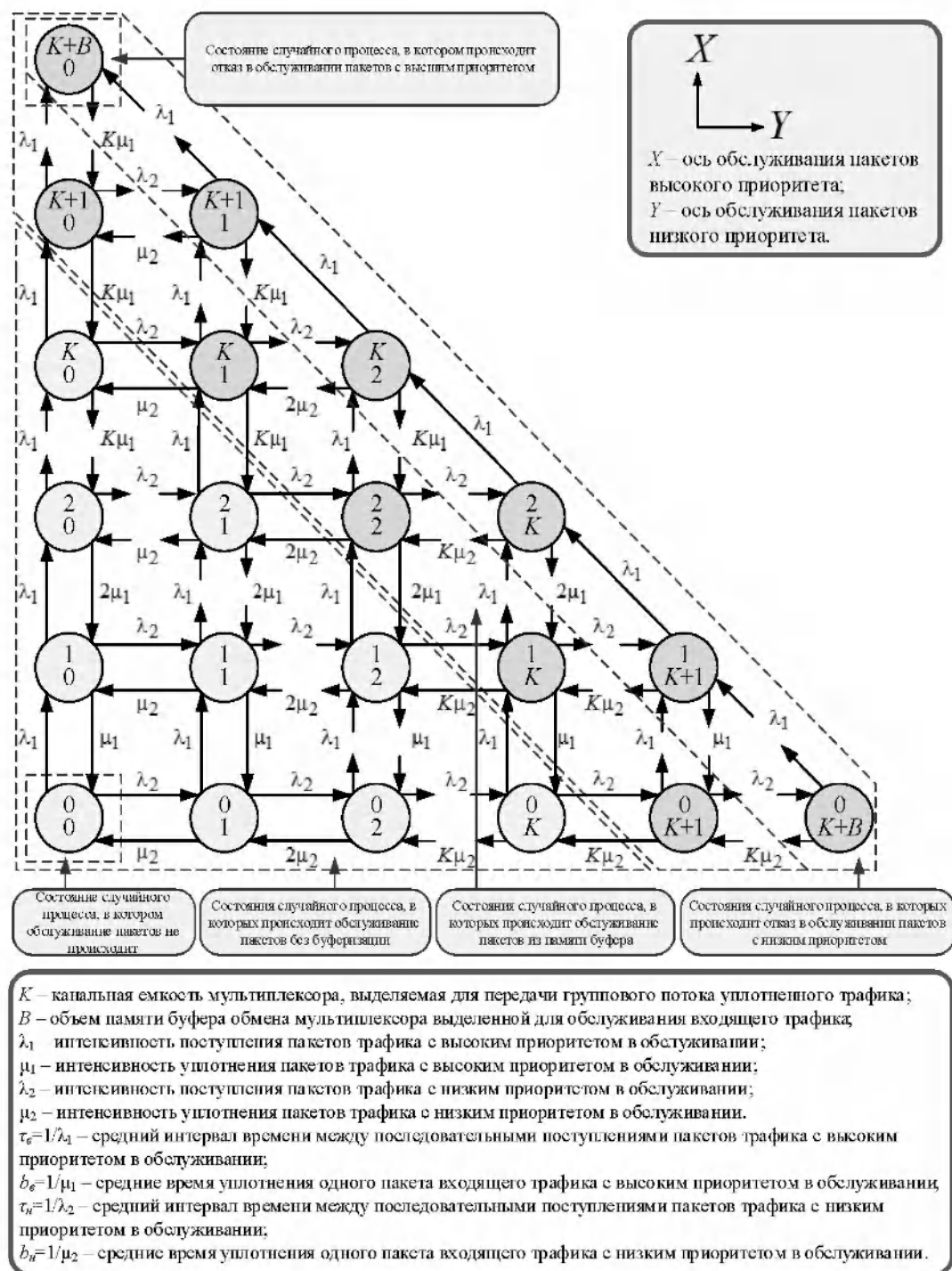


Рис. 3. Модель адаптивного мультиплексирования мультисервисного трафика с учетом приоритетов в обслуживании

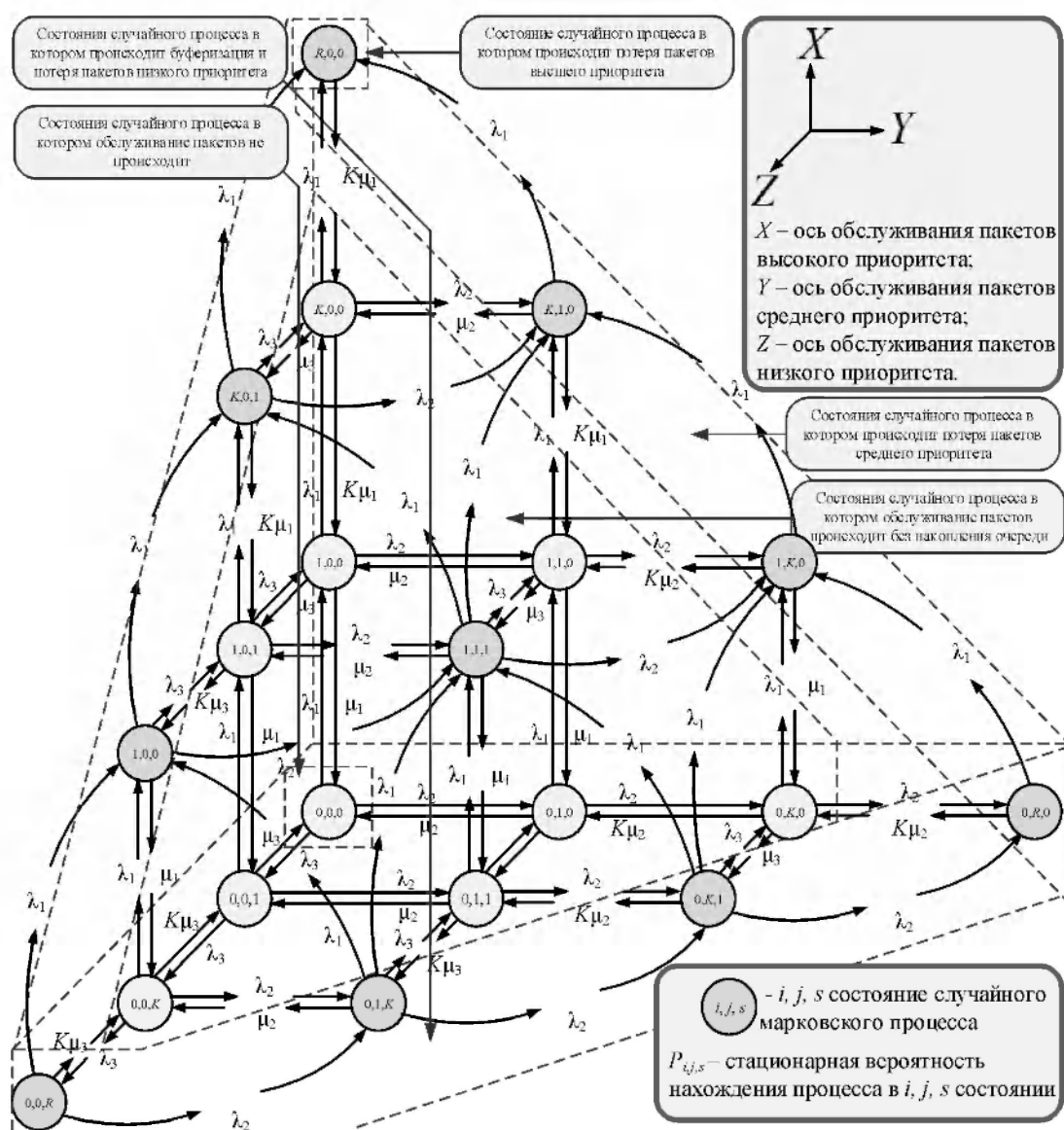


Рис. 4. Развитие модели адаптивного мультиплексирования мультисервисного трафика с учетом приоритетов в обслуживании

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = -N\alpha p_0(t) + \beta p_1(t); \\ \dot{p}_i(t) = (N-i)\alpha p_{i-1}(t) - ((N-i+1)\alpha + \\ + (N-i+1)\beta) p_i(t) + (N-i)\beta p_{i+1}(t); \\ \dot{p}_N(t) = \alpha p_{N-1}(t) - N\beta p_N(t). \end{cases} \quad (2)$$

где

P_i – стационарная вероятность нахождения процесса в i -м состоянии;

$\alpha = 1/t_a$, t_a – среднее время нахождения источника трафика в активном состоянии;

$\beta = 1/t_p$, t_p – среднее время нахождения источника трафика в пассивном состоянии.

Данный подход позволил разработать модель адаптивного мультиплексирования однородного нестационарного трафика, которая представляет собой граф переходов состояний случайного марковского процесса, который изображен на рис. 6. Модель описывает процесс обслуживания пакетов в мультиплексоре (ось y), которые поступают с изменяющейся интенсивностью от группового источника состоящего из N абонентов (ось x). Состояние процесса характеризуется двумя индексами: количеством пакетов, находящихся на обслуживании, и числом активных источников.

Сочетание моделей приоритетного обслуживания и ММПП позволяет построить обобщенную модель мультиплексирования мультисервисного трафика, приведенную на рис. 7, которая отличается от известных учетом нестационарности входящих информационных потоков и приоритетов в обслуживании. Приоритеты и разнородность трафика учитываются по осям x и y , изменение интенсивности трафика (нестационарность) – по оси z .

Использование разработанной методики позволяет рассчитать вероятности стационарных состо-

яний случайного марковского процесса, моделирующего работу статистического мультиплексора и оценить вероятностно-временные характеристики (ВВХ) качества обслуживания мультисервисного трафика. Методика расчета указанных характеристик включает 4 этапа:

Этап 1. Для расчёта стационарных вероятностей состояний $p_{i,j,k}$ рассматриваемой модели составляется система на основе уравнений баланса переходов:

$$\begin{cases} (\lambda_1 + \lambda_2) p_{i,j,k} = \mu_2 p_{i,j,k+1} + \mu_1 p_{i+1,j,k}, \\ i = 0, j = 0, k = 0; \\ (\lambda_1 + \lambda_2 + j\mu_2) p_{i,j,k} = j\lambda_2 p_{i,j,k-1} + \mu_1 p_{i+1,j,k} + j\mu_2 p_{i+1,j,k}, \\ i = 1, 1 < j < R, k = 0; \\ \dots \\ \sum_{k=0}^N \sum_{i=0}^R \sum_{j=0}^{R-i} p_{i,j,k} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Этап 2. Приведение к системе линейных алгебраических уравнений, описывающих граф модели:

$$\begin{cases} (\lambda_1 + \lambda_2) p_{000} = \mu_2 p_{010} + \mu_1 p_{100}; \\ (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) p_{010} = \lambda_2 p_{000} + \mu_1 p_{110} + 2\mu_2 p_{200}; \\ \dots \\ p_{000} + p_{100} + p_{200} + \dots + p_{R,R,N} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Этап 3. Решение системы линейных алгебраических уравнений:

Вводится вектор: $P = [p_z = p_{ij}, z = \overline{1, Z}]^T \Rightarrow A \times P = B$, где $A = (Z+1)Z$ -мерная матрица интенсивностей переходов;

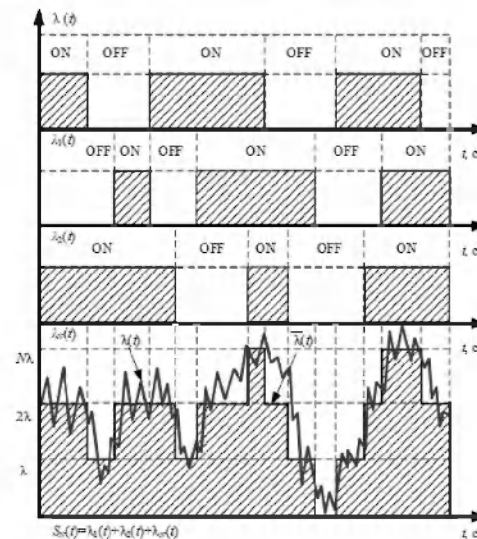
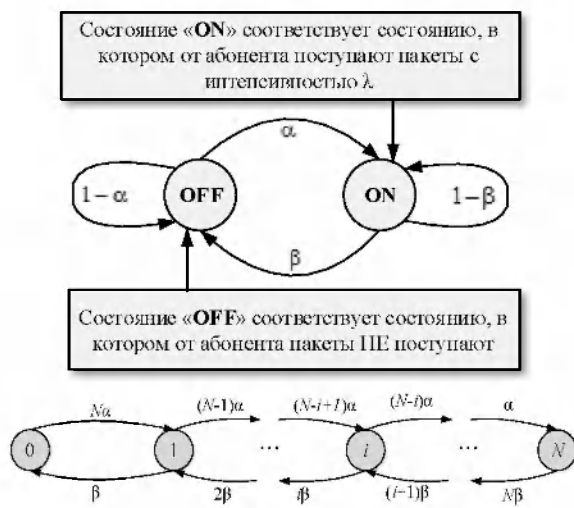
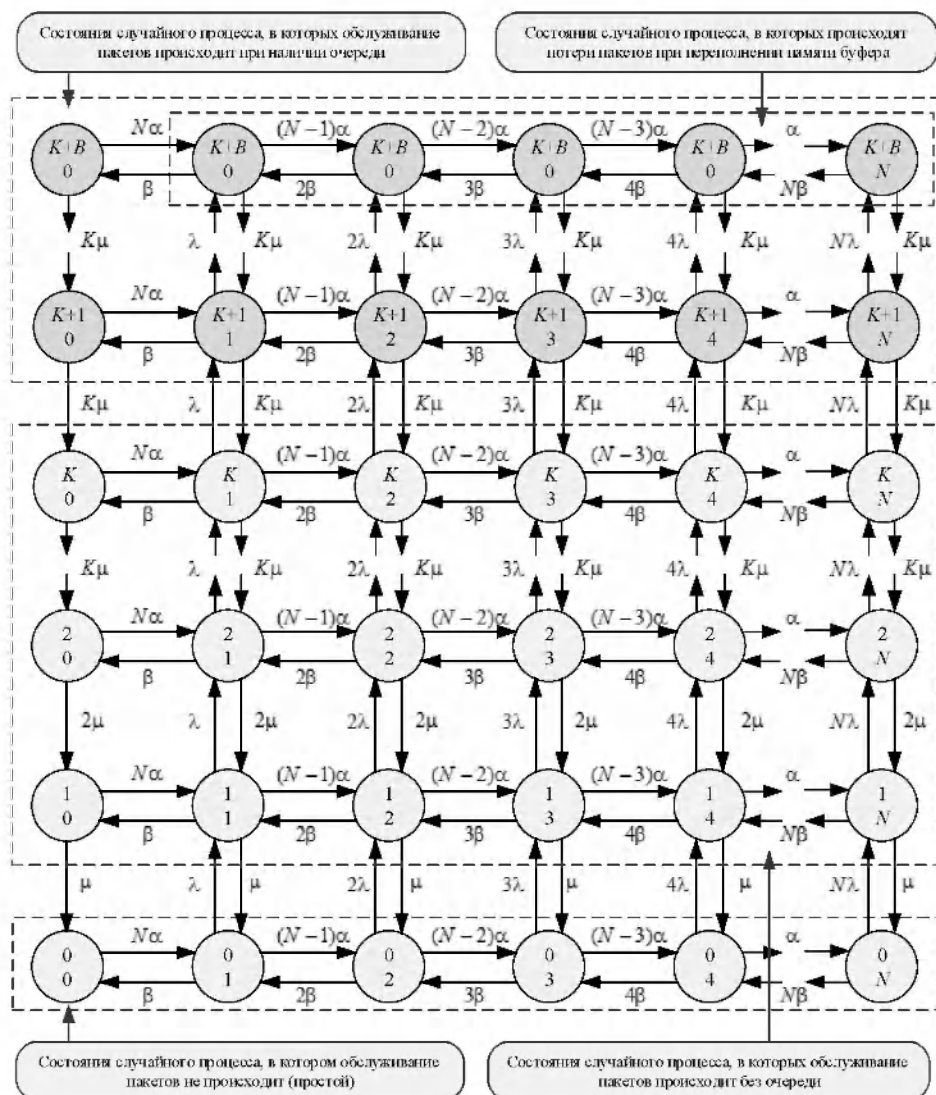


Рис. 5. Подход к моделированию нестационарного трафика



K – канальная емкость мультиплексора, выделяемая для передачи группового потока уплотненного трафика;
 B – объем памяти буфера обмена мультиплексора выделенной для обслуживания входящего трафика;
 N – количество источников трафика;
 λ – интенсивность поступления пакетов в мультиплексор;
 μ – интенсивность уплотнения пакетов в мультиплексоре;
 α – интенсивность включения источников трафика;
 β – интенсивность выключения источников трафика.



Рис. 6. Модель адаптивного мультиплексирования однородного, нестационарного трафика от группового источника

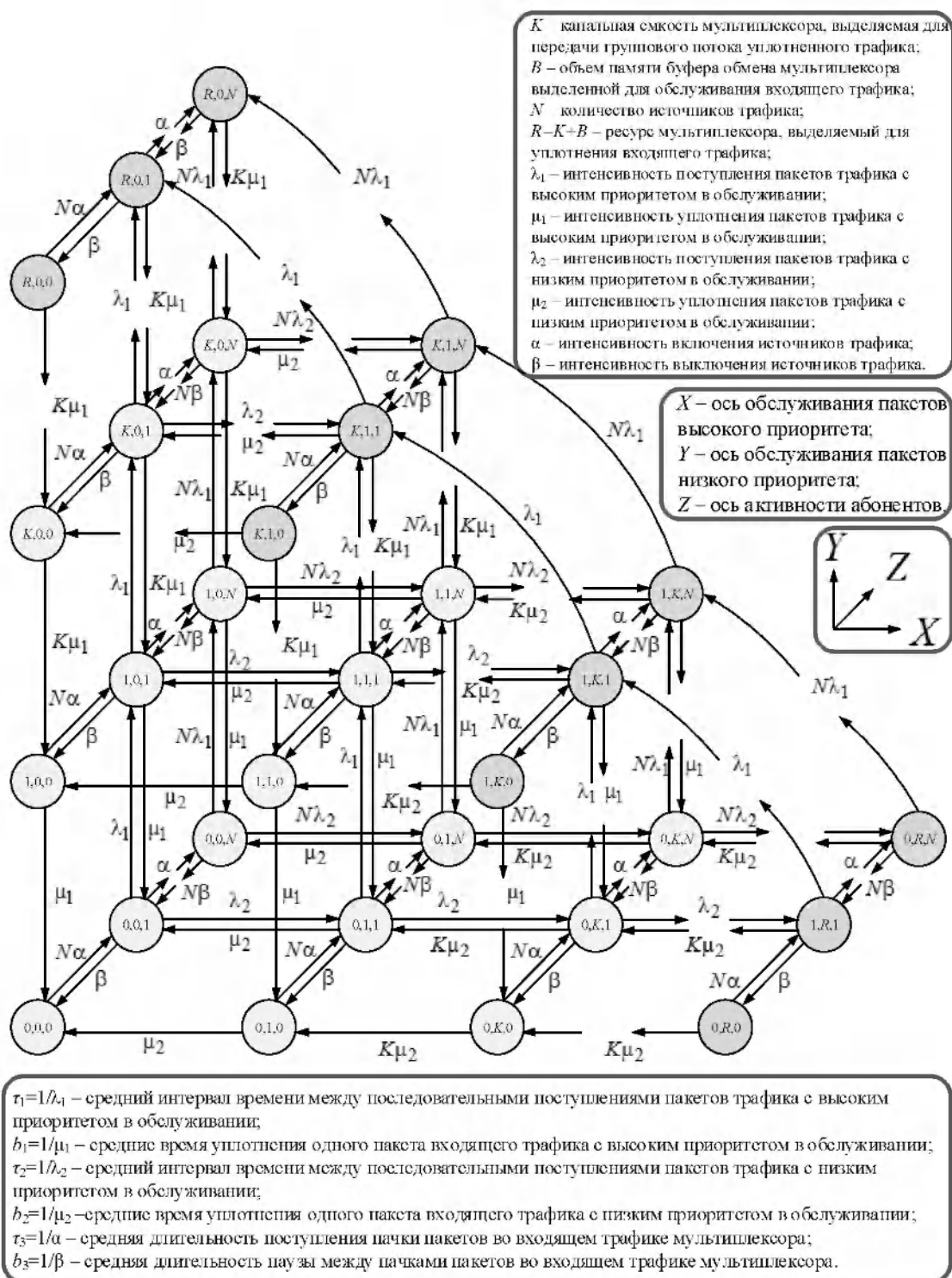


Рис. 7. Обобщенная модель адаптивного мультиплексирования мультисервисного трафика

P – Z -мерный вектор ненулевых состояний системы массового обслуживания;

B – $(Z+1)$ -мерный вектор правых частей.

Решение матричного уравнения: $P = A' \times B$, где A' – матрица, псевдообратная матрице A , определяемая как $A' = [A^T A]^{-1} A^T$.

Этап 4. Расчет вероятности потери (переполнения) буфера мультиплексора) пакетов с высоким и низким приоритетом:

$$P_{n1} = \sum_{k=1}^N p_{ijk}, i = R, j = 0; P_{n2} = \sum_{k=1}^N \sum_{i=0}^R p_{ijk}, j = R - i. \quad (5)$$

Расчет среднего времени задержки пакетов с высоким и низким приоритетом в памяти буфера мультиплексора до начала передачи:

$$\bar{q}_1 = \sum_{k=0}^N \sum_{i=K+1}^R (i-K) \sum_{j=0}^{R-i} p_{ijk}; \bar{q}_2 = \sum_{k=0}^N \sum_{l=1}^B \sum_{i=0}^{K+j} \sum_{j=K+l-i}^R p_{ijk}. \quad (6)$$

Расчет среднего времени задержки пакетов с высоким и низким приоритетом в памяти буфера мультиплексора до начала передачи:

$$\bar{w}_1 = \bar{q}_1 / [\lambda_1(1 - P_{n1})]; \bar{w}_2 = \bar{q}_2 / [\lambda_2(1 - P_{n2})]. \quad (7)$$

Расчет среднего времени задержки с высоким и низким приоритетом при обслуживании в мультиплексоре:

$$\bar{\tau}_1 = 1/\mu_1; \bar{\tau}_2 = 1/\mu_2. \quad (8)$$

Расчет среднего времени задержки в мультиплексоре с высоким и низким приоритетом:

$$T_{z1} = \bar{w}_1 + \bar{\tau}_1 = \bar{q}_1 / [\lambda_1(1 - P_{n1})] + 1/\mu_1; \\ T_{z2} = \bar{w}_2 + \bar{\tau}_2 = \bar{q}_2 / [\lambda_2(1 - P_{n2})] + 1/\mu_2. \quad (9)$$

Расчет коэффициента мультиплексирования мультиплексора ЗССС производится методом численного перебора параметров:

$$\rho = \frac{N}{K} \rightarrow \max \begin{cases} P_{n1} \leq P_{\text{треб1}}, P_{n2} \leq P_{\text{треб2}}; \\ T_{z1} \leq T_{\text{треб1}}, T_{z2} \leq T_{\text{треб2}}. \end{cases} \quad (10)$$

Расчет ВВХ трафика при его мультиплексировании позволяет обоснованно управлять назначением приоритетов в обслуживании в зависимости от статистических характеристик входных потоков и пропускной способности каналов.

Для управления параметрами качества обслуживания мультисервисного трафика предложен алгоритм диспетчеризации потоков мультисервисного трафика при адаптивном мультиплексировании (рис. 8), который отличается от известных наличием механизма дина-

мического назначения приоритетов при обслуживании мультисервисного трафика. Особенностью работы данного алгоритма является учет приоритетности пакетов трафика при поступлении в буфер мультиплексора. Если в буфере мультиплексора имеются пакеты трафика низкого приоритета, то при его переполнении происходит сброс пакета и помещение в буфер пакетов с более высоким приоритетом. При отказе в обслуживании пакетов высшего приоритета происходит коррекция показателей качества обслуживания, пересчет параметров модели и перераспределение приоритетов в обслуживании до тех пор, пока необходимое качество обслуживания не будет достигнуто.

В дополнение к первому алгоритму предложен алгоритм диспетчеризации потоков мультисервисного трафика при адаптивном мультиплексировании, представленный на рис. 9, который отличается от известных учетом не только приоритетов в обслуживании, но и нестационарности входящего потока, для различных режимов работы спутниковой радиолинии. Схема работы данного алгоритма предполагает статистическую оценку параметров потока трафика, включая проверку на нестационарность. В случае изменения интенсивности потока и выхода за пределы допустимого происходит коррекция показателей качества обслуживания трафика, пересчет параметров модели, коррекция плана распределения потоков осуществляется до тех пор, пока необходимое качество обслуживания потока высшего приоритета не будет достигнуто. Изменение режимов работы спутниковой радиолинии учитывается путем опроса текущей конфигурации модемного оборудования с последующей коррекцией режима работы мультиплексора и запросом о выделении дополнительного радиоресурса ЗССС, если таковой имеется.

Для оценки изменения качества обслуживания трафика при адаптивном мультиплексировании проведено исследование зависимостей, которые изображены на рис. 10 и 11. В качестве исходных использовались три вида трафика: IP-телефонии, видеопотока и передачи данных.

Анализ графика на рис. 10 показал, что вероятность потери пакетов при адаптивном мультиплексировании мультисервисного трафика возрастает при увеличении количества организованных виртуальных каналов связи и уменьшается при увеличении времени задержки при обслуживании пакетов. Вероятность потери пакетов и задержка сообщений увеличиваются при повышении коэффициента активности источника трафика (рис. 11).

Для оценки эффективности применения разработанных моделей и алгоритмов проведено исследование зависимостей изменения коэффициента мультиплексирования от различных параметров мультиплексирования и свойств источников трафика (рис. 12–13).

Коэффициент мультиплексирования каналов связи, организуемых мультиплексором ЗССС, повышается с ростом его канальной емкости и понижением активности источников трафика. Чем выше требования к

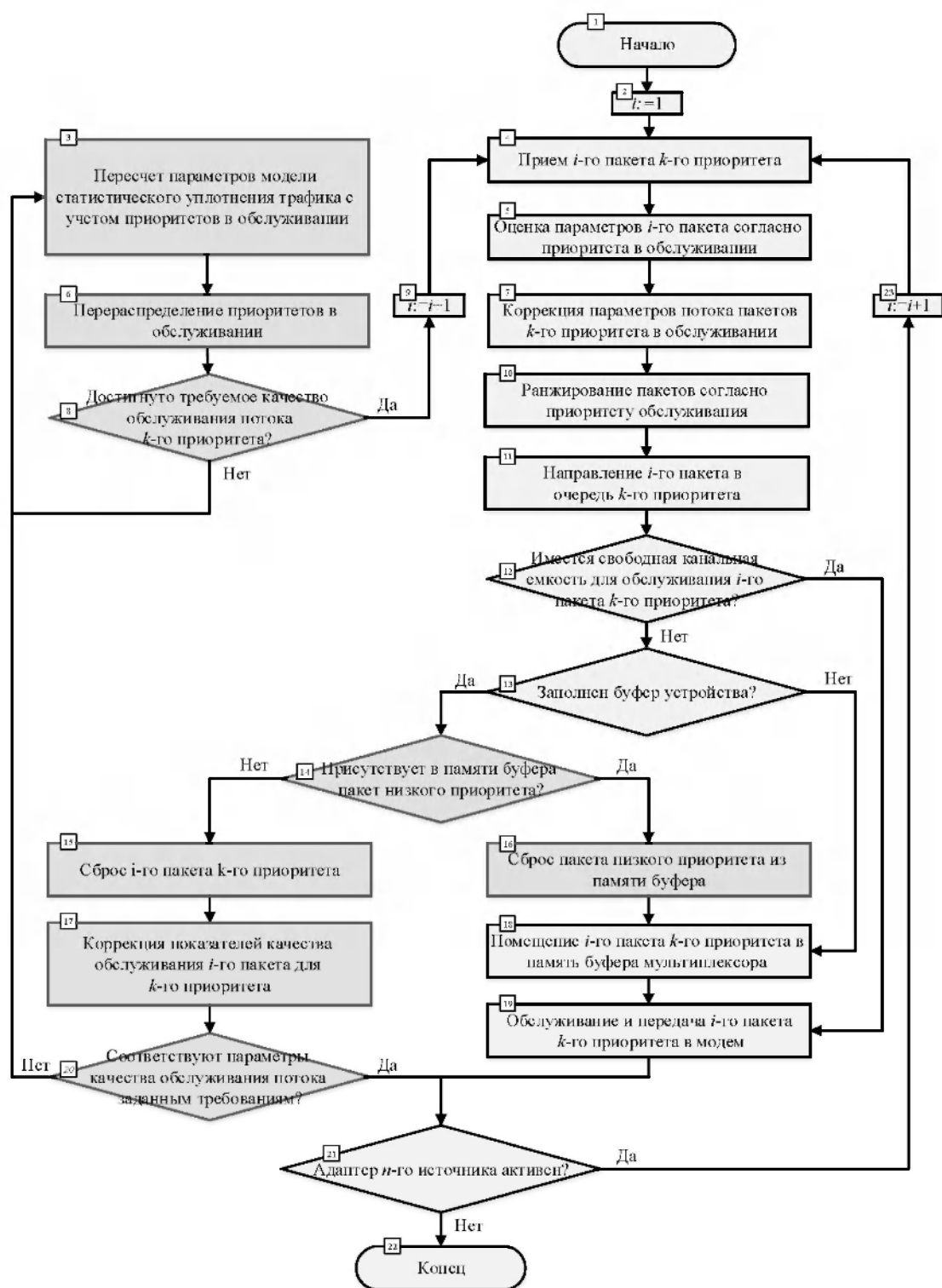


Рис. 8. Алгоритм диспетчеризации потоков мультисервисного трафика при адаптивном мультиплексировании с учетом приоритетов в обслуживании

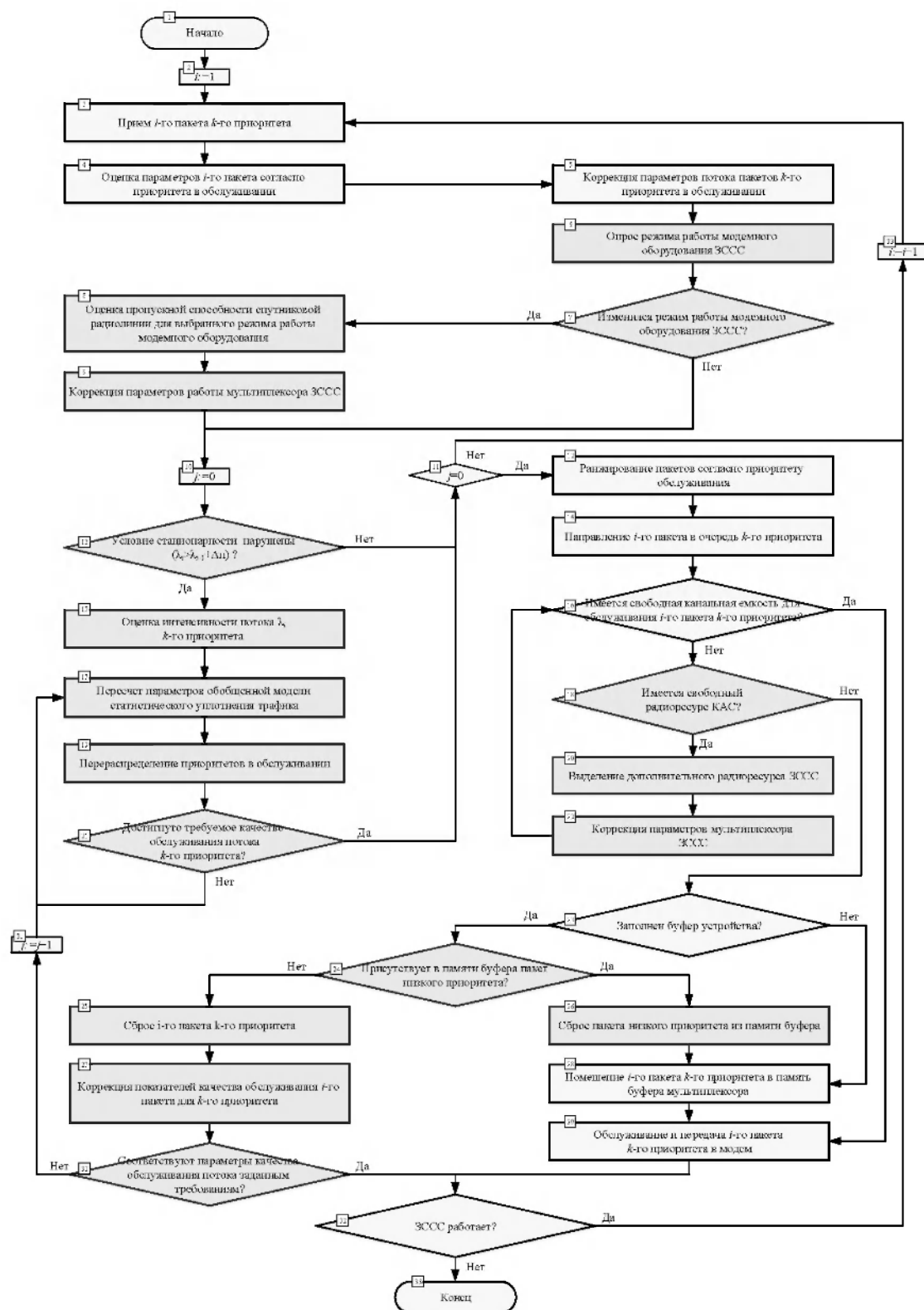


Рис. 9. Алгоритм диспетчеризации потоков мультисервисного, нестационарного трафика с учетом изменения пропускной способности каналов спутниковой связи

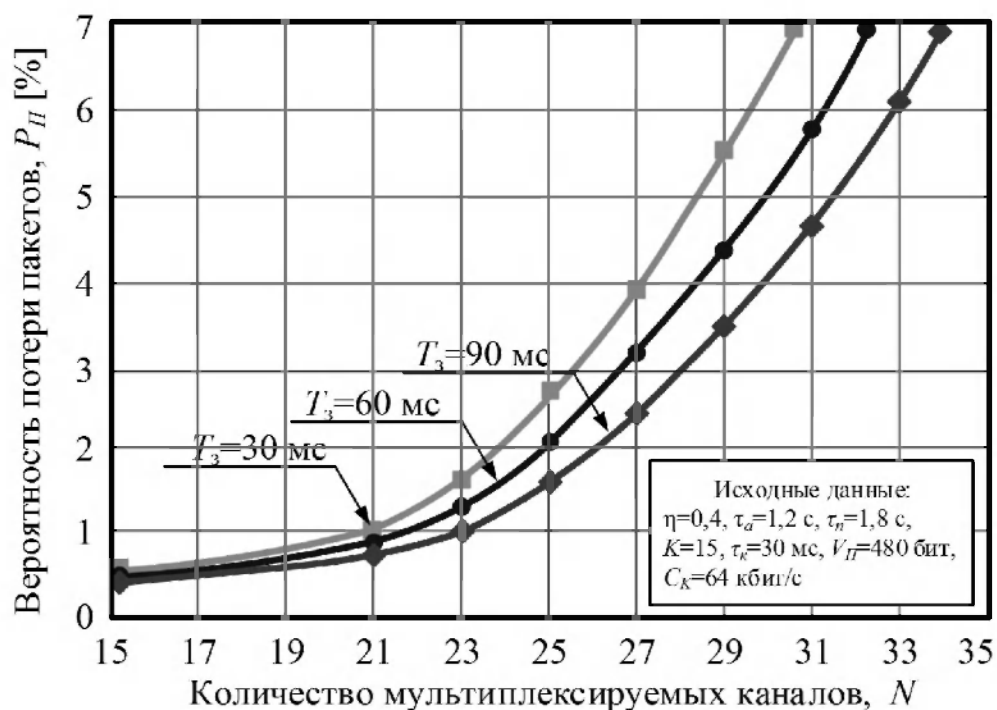


Рис. 10. Зависимость вероятности потери пакетов от количества источников трафика для различных значений допустимой задержки

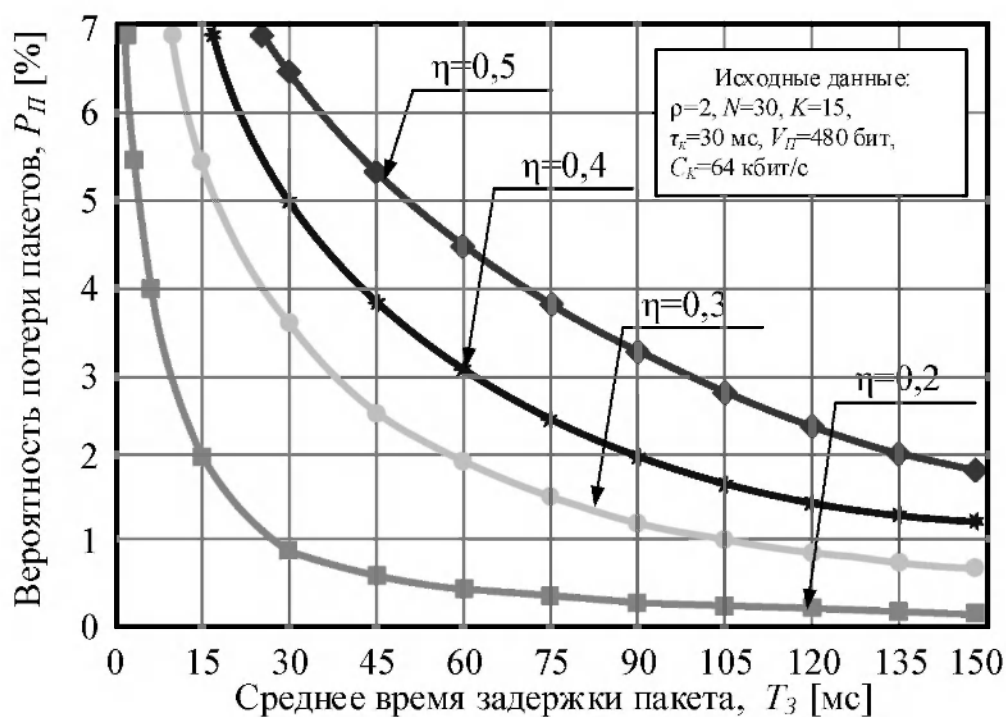


Рис. 11. Зависимость вероятности потери пакетов от задержки при различной активности источников трафика

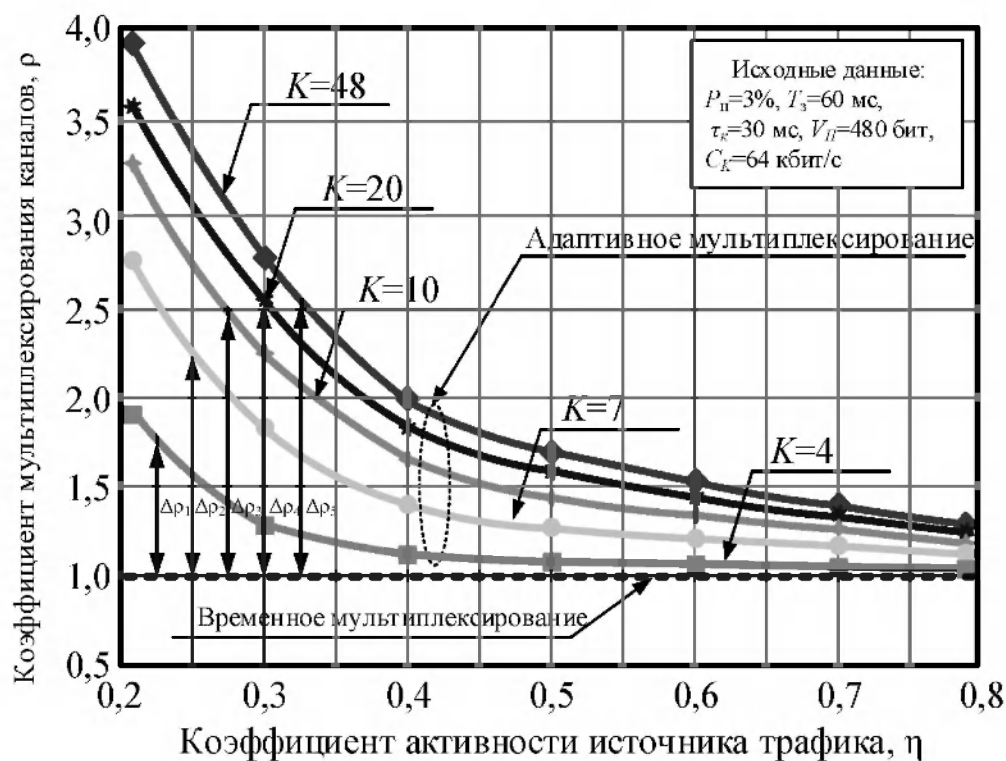


Рис. 12. Зависимость коэффициента мультиплексирования от активности источников трафика при изменении канальной емкости мультиплексора

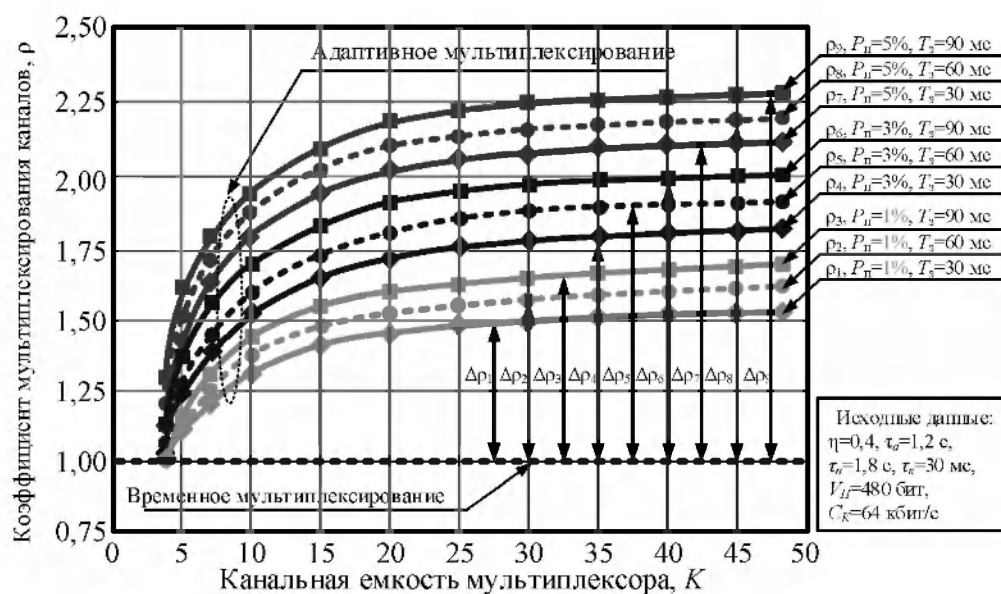


Рис. 13. Зависимость коэффициента мультиплексирования от канальной емкости мультиплексора при различных требованиях к качеству обслуживания

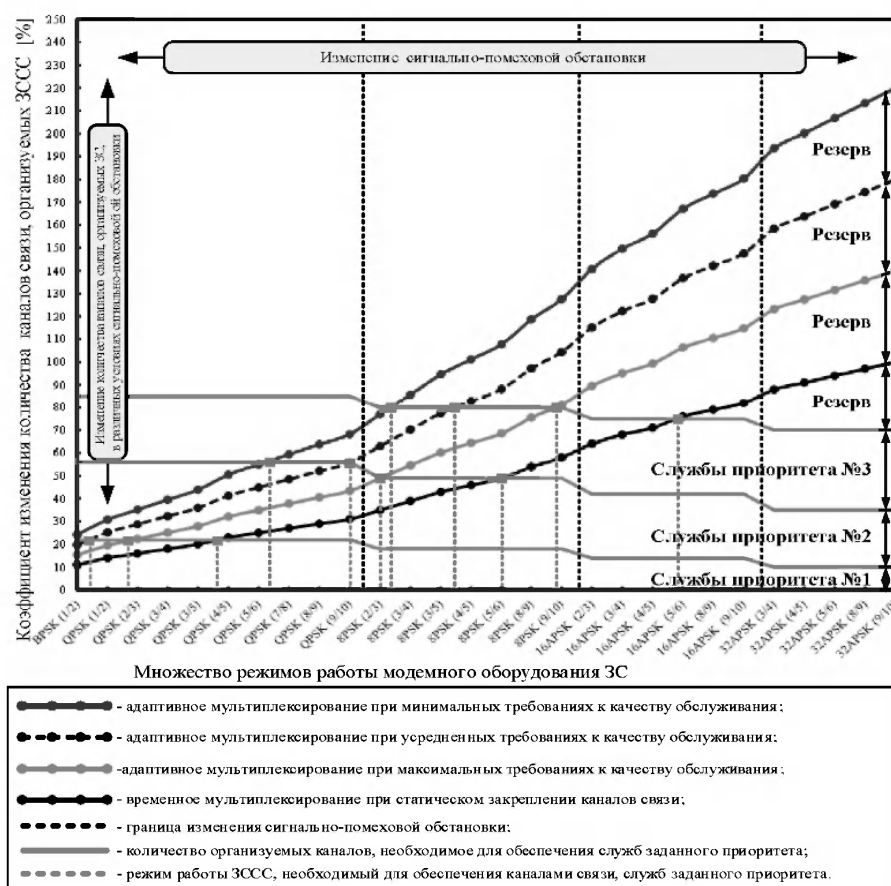


Рис. 14. График изменения количества каналов связи, организуемых ЗССС в различных условиях сигнально-помеховой обстановки

качеству обслуживания, тем меньше коэффициент мультиплексирования.

Обобщая полученные зависимости, можно оценить достигаемый выигрыш в числе каналов, организуемых ЗССС на основе предложенной технологии адаптивного мультиплексирования по сравнению с традиционной технологией мультиплексирования в различных условиях сигнально-помеховой обстановки (рис. 14).

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование технологии адаптивного мультиплексирования в сочетании с механизмом динамического назначения приоритетов в обслуживании мультисервисного трафика позволяют заметно увеличить число уплотняемых каналов связи по сравнению с традиционной технологией мультиплексирования, что соответствует повышению пропускной способности ЗССС. При этом стоит отметить, что повышение пропускной способности будет зависеть от требований, предъявляемых к качеству обслуживания, структуры передаваемого трафика, а также выбора режима работы модемного оборудования. Так, при наиболее жестких требованиях

к качеству обслуживания выигрыш составит до 40%, без требований (предельно достижимые значения) — до 120%, что в среднем составляет 80%.

Литература

1. Михайлов, Р. Л. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов / Р.Л. Михайлов, С.И. Макаренко // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. — 2013. — № 4. — С. 69–79.
2. Худяков, Г. И. Пропускная способность цифровых каналов электросвязи с квадратурной амплитудной модуляцией / Г.И. Худяков // Электросвязь. — 2010. — № 6. — С. 38–40.
3. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания: учебник / Л. Клейнрок; пер. И.И. Грушко; ред. В.И. Нейман. — М.: Машиностроение, 1979. — 432 с.
4. Adas, A. Traffic models in broadband networks / A. Adas // IEEE Communication magazine. — 1997. — Vol. 35, No. 7. — P. 82–89.
5. Muscariello, L. Markov models of internet traffic and a new hierarchical MMPP model / L. Muscariello // Computer communications. — 2005. — Vol. 28 (16). — P. 1835–1851.