

# ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛИ ОПТИЧЕСКОГО КОММУТАТОРА В СЕТИ С ОПТИЧЕСКОЙ КОММУТАЦИЕЙ ПАЧЕК ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПРОТОКОЛА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ JET

**Миронов Юрий Борисович,**  
к.т.н., в/ч 33965, Москва, Россия,  
[mistiam@gmail.com](mailto:mistiam@gmail.com)

**Бужин Игорь Геннадьевич,**  
к.т.н., в/ч 33965, Москва, Россия,  
[bigvrn93@mail.ru](mailto:bigvrn93@mail.ru)

**Гайдамака Юлия Васильевна,**  
к.ф.-м.н., Доцент кафедры прикладной информатики  
и теории вероятностей, РУДН, Москва, Россия,  
[ygaidamaka@mail.ru](mailto:ygaidamaka@mail.ru)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 15-07-03051, 15-07-03608.

**Ключевые слова:** сети оптической пакетной коммутации, Optical Packet Switching (OPS), оптическая коммутация блоков, оптическая коммутация пачек, Optical Burst Switching (OBS), протокол резервирования длины волн с отложенным резервированием, Just Enough Time (JET).

Сети оптической пакетной коммутации (Optical Packet Switching, OPS) сочетают в себе преимущества оптических сетей с маршрутизацией по длине волны и сетей с коммутацией пакетов. Применение принципа оптической коммутации блоков или оптической коммутации пачек (Optical Burst Switching, OBS) потребовало разработки специализированных протоколов сигнализации, одним из которых является протокол резервирования длины волны JET (Just Enough Time, отложенное резервирование). Согласно протоколу JET резервирование длины волны в оптическом коммутаторе происходит не с момента поступления заголовка пачки, т.н. "контрольного пакета" (burst header packet, BHP), а лишь с момента поступления т.н. "информационной пачки" (data burst, DB). Поскольку в этом случае резервирование происходит только на время передачи информационной пачки, протокол JET обеспечивает меньшую длительность занятия длины волны, чем при других известных подходах, например, схеме JIT (Just In Time, мгновенное резервирование) и схеме Horizon. Построена математическая модель оптического коммутатора, позволяющая проводить анализ вероятности блокировки пачки, которая является одной из основных характеристик функционирования сети оптической коммутации. На первом этапе построена математическая модель передачи пачек оптическим коммутатором для одной длины волны в виде марковской цепи с двумя состояниями. В предположении о геометрическом распределении длины пачки получена матрица вероятностей переходов между состояниями цепи Маркова, зависящая от интенсивности поступления пачек в оптический коммутатор. На втором этапе модель обобщена на случай конечного числа длин волн и для обобщенной модели получена формула для расчета вероятности блокировки пачки оптическим коммутатором при применении в сети оптической коммутации пачек протокола JET. Также разработана имитационная модель протокола в системе моделирования общего назначения (General Purpose Simulation System, GPSS). Представлены результаты численного анализа, иллюстрирующие зависимость вероятности блокировки от задержки резервирования длины волны и от длины пачки.

## Для цитирования:

Миронов Ю.Б., Бужин И.Г., Гайдамака Ю.В. Построение и анализ модели оптического коммутатора в сети с оптической коммутацией пачек при применении протокола резервирования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Том 10. – №2. – С. 12-18.

## For citation:

Mironov Yu.B., Buzhin I.G., Gaidamaka Yu.V. Optical switch modelling in optical burst switching network with protocol Jet. T-Comm. 2016. Vol. 10. No.2, pp. 12-18. (in Russian)

## Введение

В настоящее время известны два общепризнанных принципа коммутации информационных сигналов в высокоскоростных оптических сетях: волновая маршрутизация (Wavelength Routing, WR) и оптическая коммутация пакетов (Optical Packet Switching, OPS) [1-9]. В сетях с волновой маршрутизацией не требуется производить оптико-электрических преобразований, однако рабочий диапазон длин волн используется не так эффективно, как в сетях с оптической коммутацией пакетов. В последних частотный диапазон используется более полно, но появляется необходимость преобразований «оптика-электроника» в узлах коммутации, где буферизация, обеспечивающая задержку, реализуется, например, с помощью волоконно-оптических линий задержки (Fiber Delay Line, FDL) [10]. Новый комбинированный принцип коммутации Optical Burst Switching (OBS), получивший название оптической коммутации блоков [11] или оптической коммутации пачек [12], успешно сочетает преимущества двух технологий оптической коммутации. В данной технологии нет буферизации и электронной обработки данных в промежуточных узлах, а оптический канал между узлами коммутации резервируется на ограниченное время. На сегодняшний день разработано несколько протоколов сигнализации для сетей с оптической коммутацией пачек, однако полностью оптического оборудования для таких сетей ещё не создано. В статье исследуется протокол резервирования длины волны JET (Just Enough Time, отложенное резервирование) [9], при котором длина волны резервируется только на время передачи информационной части пачки, что повышает пропускную способность оптического канала по сравнению с другими известными подходами, например, со схемой JIT (Just In Time, мгновенное резервирование) и схемой Horizon [13, 14].

Статья организована следующим образом. В первом разделе описываются принципы работы протокола сигнализации JET. Во втором разделе построена математическая модель протокола на основе марковской цепи. В третьем разделе приводится листинг программы имитационного моделирования данного протокола в системе моделирования общего назначения GPSS (General Purpose Simulation System). В четвертом разделе выполнен численный анализ результатов имитационного моделирования, проведено сравнение расчетов вероятности блокировки на основе математической модели марковской цепи, с использованием приближенного метода первой формулы Эрланга и моделирования работы протокола в GPSS.

### I. Протокол сигнализации JET

Пачкой (burst) в сетях оптической пакетной коммутации называется несколько пакетов одного уровня обслуживания, которые передаются вместе от одного узла-источника (ingress node) к одному и тому же узлу назначения (egress node), причем при коммутации в транзитных узлах сети (core nodes) состав пачки не изменяется. Пачка состоит из заголовка (burst header packet) - так называемый «контрольный пакет» (КП), и информационной части (data burst) - «информационная пачка» (ИП). При исследовании работы оптического коммутатора (optical switch)

анализируются потери пачек из-за нехватки ресурсов в исходящем оптическом канале, для которого далее детально описана процедура резервирования длии волн и передачи информационных пачек.

Контрольный пакет поступает в оптический коммутатор по каналу управления и содержит адрес назначения, длительность интервала времени, через который должна поступить информационная пачка, называемого задержкой (offset time), и данные о длине информационной пачки. В момент поступления КП по адресу назначения пачки выбирается исходящий оптический канал, на котором согласно протоколу JET резервируется одна из длии волн на время, необходимое для передачи информационной пачки соответствующей длины. Длина волны резервируется не с момента поступления КП, как в протоколе JIT (Just In Time, мгновенное резервирование), а через время задержки, которое иногда является постоянной величиной. Поиск свободной длины волны в оптическом канале по направлению передачи пачки осуществляется последовательным перебором длии волн – от максимальной длины волны к минимальной. Если свободная длина волны найдена, то на время передачи ИП она резервируется с момента начала передачи, отстоящего от момента поступления КП на время задержки. Если обнаруживается, что все длины волн на момент начала передачи уже зарезервированы поступившими ранее контрольными пакетами, то происходит отмена выполненного ранее резервирования для ИП на максимальной длине волны, и эта длина волны резервируется для информационной пачки, соответствующей вновь поступившему контрольному пакету. В этом случае вытесненная информационная пачка в момент поступления будет заблокирована.

На рисунках 1-3 изображен пример, иллюстрирующий работу протокола JET в дискретном времени. Полагаем, что задержка и длины информационных пачек кратны длине слота, поэтому интервал задержки начинается в момент начала временного слота, следующего за слотом поступления КП. В примере время  $a$  задержки постоянно и равно 5 временным слотам, а длины  $L_i$  информационных пачек,  $i \geq 1$ , случайны. В оптическом канале для передачи ИП доступны три длины волны –  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$ . Границы ИП, для которых выполнено резервирование длины волны, изображены на рисунках пунктирным контуром, а границы ИП, для которых выполняется передача на зарезервированной длине волны, изображены сплошным контуром.

Предполагается, что в момент  $t_0$  все длины волн в оптическом канале свободны. В рассмотренном примере в первый временной слот  $[t_0, t_1]$  поступают два контрольных пакета – КП 1 и КП 2 (рис. 1). Согласно принципу LIFO (Last In First Out) КП 1 резервирует длину волны  $w_3$  на интервал  $[t_0 + a, t_0 + a + L_1] = [t_6, t_{14}]$  для передачи своей информационной пачки ИП 1, которая имеет длину  $L_1 = 8$  слотов и поступит в коммутатор через  $a=5$  слотов. Аналогично, КП 2 резервирует длину волны  $w_2$  на интер-

вал  $[t_0 + a, t_0 + a + L_2] = [t_6, t_{12}]$  для передачи ИП 2, которая имеет длину  $L_2 = 6$  слотов.

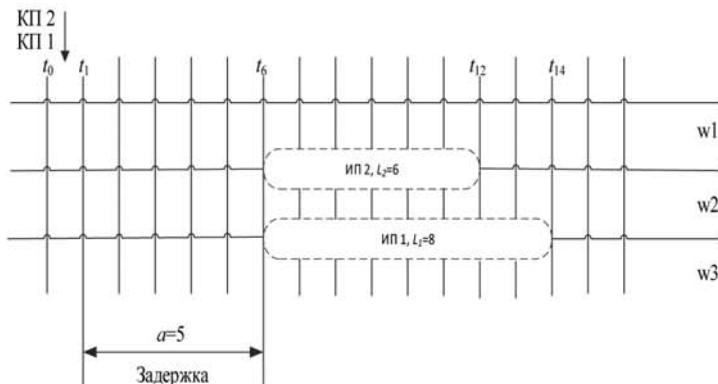


Рис. 1. Резервирование длин волн при поступлении КП 1 и КП 2 в слоте  $[t_0, t_1]$

Далее во втором временном слоте  $[t_1, t_2]$  поступают три КП – КП 3, КП 4 и КП 5 (рис. 2). При переборе длин волн от  $w3$  к  $w1$  на момент  $t_2 + a = t_7$ , соответствующий моменту поступления ИП 3, имеется свободная длина волны  $w1$ , которая резервируется для передачи ИП 3 длиной  $L_3 = 8$  слотов на интервале  $[t_7, t_{15}]$ . Для ИП 4 и ИП 5 на момент  $t_7$  их поступления свободных длин волн не будет. В этом случае по протоколу JET отменяется резервирование длин волн, выполненное ранее для ИП 1 и ИП 2, а высвободившиеся длины волн резервируются для передачи ИП 4 и ИП 5 согласно принципу LIFO: длина волны  $w1$  резервируется для передачи ИП 4 длиной  $L_4 = 9$  слотов на интервале  $[t_7, t_{16}]$ , а длина волны  $w2$  – для передачи ИП 5 длиной  $L_5 = 7$  слотов на интервале  $[t_7, t_{14}]$ . Таким образом, ИП 1 и ИП 2 в момент  $t_6$  своего поступления в коммутатор будут заблокированы.

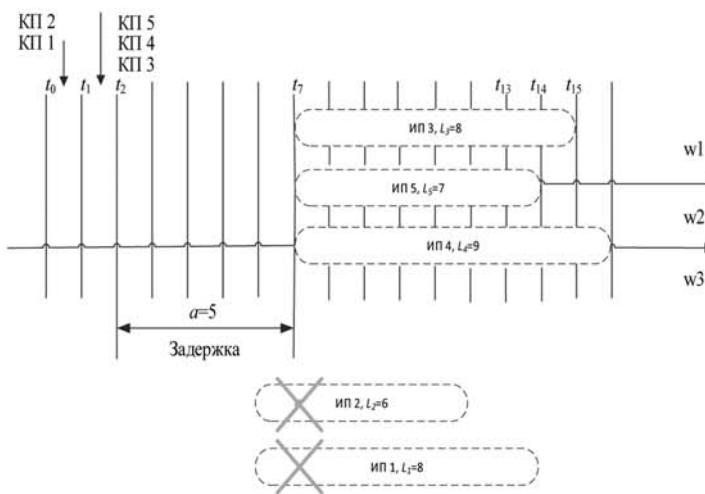


Рис. 2. Резервирование длин волн и блокировки ИП при поступлении КП 3 – КП 5 в слоте  $[t_1, t_2]$

На рис. 3 показано, что поступление КП 6 в слоте  $[t_7, t_8]$ , когда на момент  $t_8$  на всех длинах волн будет вестись начавшаяся до момента поступления КП 6 передача информационных пачек, не окажет влияния на передачу ИП 3-ИП 5, а ИП 6 длиной  $L_6 = 4$  слота в момент  $t_{13}$  своего поступления в коммутатор будет заблокирована.

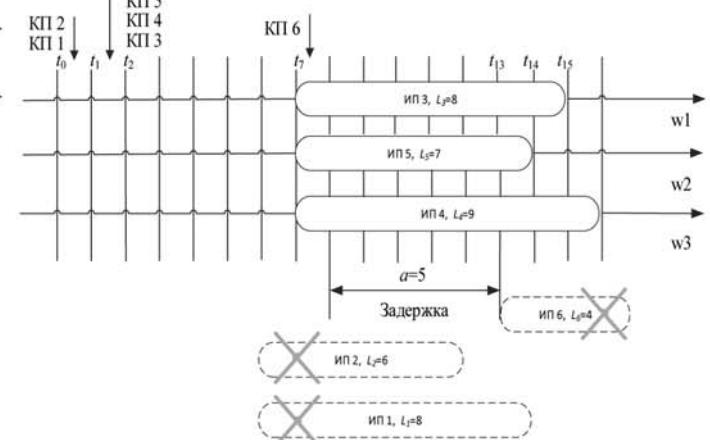


Рис. 3. Резервирование длин волн и блокировка ИП при поступлении КП 6 в слоте  $[t_7, t_8]$

В следующем разделе построена математическая модель оптического коммутатора, позволяющая проводить анализ вероятности блокировки информационной пачки, которая является одной из основных характеристик функционирования сети оптической коммутации.

## 2. Математическая модель протокола JET на основе марковской цепи

Для анализа вероятности блокировки информационной пачки в случае занятости всех длин волн построим математическую модель процесса передачи пачек по оптическому каналу в соответствии с протоколом JET в дискретном времени [16]. Положим время задержки и длительности передачи информационных пачек кратными длине временного слота. Положим также, что контрольные пакеты поступают в систему в соответствии с пуассоновским законом интенсивности  $\lambda$ , где  $\lambda$  – среднее количество КП, поступающих в один временной слот. Пусть для передачи ИП система имеет  $w$  длины волн, тогда  $\bar{\lambda} = \lambda / w$  – интенсивность поступающего потока КП на одну длину волны.

Обозначим  $\xi$  случайную величину (СВ) времени задержки, имеющую закон распределения  $P\{\xi < a\} = f(a)$ ,  $a \geq 0$ . Тогда для каждого КП выражение  $\sum_{a=0}^{n-1} f(a)$  опре-

деляет вероятность того, что СВ задержки не превысит  $(n-1)$  слотов, а дополнительная вероятность  $\left(1 - \sum_{a=0}^{n-1} f(a)\right)$  соответствует тому, что спустя  $(n-1)$  слот после поступления контрольного пакета соответствующая

информационная пачка ещё не пришла. Среднее число ИП, которые поступят в  $n$ -й слот после поступления КП, равно  $n\lambda f(n)$ .

Тогда интенсивность потока ИП, иными словами, среднее число  $\lambda_{(n)}$  информационных пачек, поступающих за слот, определяется следующей формулой:

$$\lambda_{(n)} = \lambda \left( 1 - \sum_{a=0}^{n-1} f(a) \right). \quad (1)$$

Обозначим  $\eta$  СВ длины информационной пачки с законом распределения  $P\{\eta < l\} = g(l)$ ,  $l \geq 0$ . Предположим, что длина ИП имеет геометрический закон распределения с заданным средним  $L$ , т.е.  $g(l) = q(1-q)^{l-1}$ , где  $q = 1/L$ .

Рассмотрим систему с одной длиной волны:  $w = 1$ . Обозначим  $S^{(n)}$  состояние длины волны на слоте  $n$ , причем  $S^{(n)} = 1$ , если на слоте  $n$  длина волны занята передачей информационной пачки,  $S^{(n)} = 0$  в противном случае. Последовательность  $\{S^{(n)}, n \geq 0\}$  образует неоднородную цепь Маркова (ЦМ),  $S^{(n)} \in \{0, 1\}$ . Матрица  $D^{(n)}$  переходных вероятностей ЦМ  $\{S^{(n)}, n \geq 0\}$  на шаге  $n$  имеет следующий вид:

$$D^{(n)} = \begin{pmatrix} p_{0,0}^{(n)} & p_{0,1}^{(n)} \\ p_{1,0}^{(n)} & p_{1,1}^{(n)} \end{pmatrix},$$

где переходные вероятности  $p_{i,j}^{(n)} = P\{S^{(n+1)} = j | S^{(n)} = i\}$

на шаге  $n$  определяются формулой

$$p_{i,j}^{(n)} = \begin{cases} e^{-\bar{\lambda}_{(n+1)}}, & i = j = 0; \\ 1 - e^{-\bar{\lambda}_{(n+1)}}, & i = 0, j = 1; \\ qe^{-\bar{\lambda}_{(n+1)}}, & i = 1, j = 0; \\ 1 - qe^{-\bar{\lambda}_{(n+1)}}, & i = j = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $\bar{\lambda}_{(n+1)}$  – интенсивность поступающего потока ИП на одну длину волны на шаге  $(n+1)$ . Для случая  $w = 1$  интенсивность  $\bar{\lambda}_{(n+1)}$  равна  $\lambda_{(n+1)}$ .

Для общего случая системы с  $w$  длинами волн, где  $w \geq 1$ , обозначим  $Z^{(n)}$  число занятых длин волн на слоте  $n$ . Как и в случае  $w = 1$ , последовательность  $\{Z^{(n)}, n \geq 0\}$  образует неоднородную ЦМ,  $Z^{(n)} \in \{0, 1, \dots, w\}$ . Матрица  $R^{(n)}$  переходных вероятностей ЦМ  $\{Z^{(n)}, n \geq 0\}$  на шаге  $n$  имеет следующий вид:

$$R^{(n)} = \begin{bmatrix} r_{0,0}^{(n)} & \dots & r_{0,w}^{(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{w,0}^{(n)} & \dots & r_{w,w}^{(n)} \end{bmatrix},$$

где переходные вероятности  $r_{i,j}^{(n)} = P\{Z^{(n+1)} = j | Z^{(n)} = i\}$

на шаге  $n$  определяются формулой

$$r_{i,j}^{(n)} = \begin{cases} \sum_{z=0}^i \binom{i}{z} q^z (1-q)^{i-z} e^{-\bar{\lambda}_{(n+1)}} \frac{\lambda_{(n+1)}^{j-i+z}}{(j-i+z)!}, & j \leq w-1, i \leq j; \\ \sum_{z=0}^j \binom{j}{(i-j+z)} q^{i-j+z} (1-q)^{j-z} e^{-\bar{\lambda}_{(n+1)}} \frac{\lambda_{(n+1)}^z}{z!}, & j \leq w-1, i \geq j; \\ 1 - \sum_{z=0}^{w-1} r_{i,z}^{(n)}, & j = w. \end{cases} \quad (3)$$

Начальное распределение вероятностей  $\Pi = (\pi_i)$ ,  $0 \leq i \leq w$ , ЦМ  $\{Z^{(n)}, n \geq 0\}$  на шаге  $n = 0$  может быть получено в результате решения системы уравнений равновесия

$$\pi_j = \sum_{i=0}^w \pi_i r_{i,j}^{(0)}, \quad 0 \leq j \leq w, \quad (4)$$

с условием нормировки  $\sum_{i=0}^w \pi_i = 1$ .

Зная начальное распределение  $\Pi$  и матрицу переходных вероятностей  $R^{(n)}$  на каждом шаге, можно определить вероятности  $v_i^{(n)} = P\{Z^{(n)} = i\}$ ,  $0 \leq i \leq w$ ,  $n > 0$ :

$$v_j^{(n)} = \sum_{i,m_1,m_2,\dots,m_{n-1}=0}^w \pi_i r_{i,m_1}^{(0)} r_{m_1,m_2}^{(1)} \dots r_{m_{n-1},j}^{(n-1)}, \quad 0 \leq j \leq w, \quad (5)$$

Заметим, что информационная пачка, соответствующая поступившему на шаге  $n = 0$  контрольному пакету, будет вытеснена с зарезервированной длины волны, если на любом из шагов  $n \in \{a, a+1, \dots, a+L-1\}$  цепь Маркова  $\{Z^{(n)}, n \geq 0\}$  перейдет в состояние, когда заняты все длины волн.

В [16] вероятность  $T_0(a, L)$  того, что длина волны была свободна на шаге  $n = a$  и оставалась свободной после этого в течение  $(L-1)$  такта, предлагается оценить с помощью ЦМ  $\{S^{(n)}, n \geq 0\}$  с учетом (2) по следующей формуле:

$$T_0(a, L) = p_{0,0}^{(a)} p_{0,0}^{(a+1)} \dots p_{0,0}^{(a+L-2)} = e^{-\bar{\lambda}_{a+1}} e^{-\bar{\lambda}_{a+2}} \dots e^{-\bar{\lambda}_{a+L-1}}. \quad (6)$$

Там же показано, что из (1) и (6) для случая равномерного распределения СВ  $\xi$  задержки на интервале  $[0, t_{max}]$  следует окончательное выражение для вероятности  $T_0(a, L)$ :

$$T_0(a, L) = e^{-\bar{\lambda}(L-1)} \left[ 1 - k \binom{a+L}{2} \right], \quad k = \frac{1}{1+t_{max}}. \quad (7)$$

Тогда вероятность  $B(a, L)$  блокировки информационной пачки случайной длины, имеющей геометрическое распределение со средним  $L$ , поступившей с случайной задержкой  $a$ , определяется по формуле

$$B(a, L) = 1 - T_0(a, L) \sum_{z=0}^{w-1} v_z^{(a)}, \quad (8)$$

где  $v_z^{(a)}$ ,  $0 \leq z \leq w$ , можно найти из (5), а  $T_0(a, L)$  определяется формулой (7).

Алгоритм расчета по формулам математической модели представлен ниже.

Шаг 1. Задание исходных данных:  $\lambda, w, L, t_{max}$ .

Шаг 2. Расчет начального распределения вероятностей  $\Pi = (\pi_i)$ ,  $0 \leq i \leq w$ , по формулам (3)-(4).

Шаг 3. Расчет распределения вероятностей  $\{v_i^{(n)}, 0 \leq i \leq w\}$  для  $0 \leq n \leq t_{max}$  по формуле (5).

Шаг 4. Расчет вероятности  $T_0(a, L)$  того, что длина волны была свободна на шаге  $n = a$ ,  $0 \leq a \leq t_{max}$ , по формуле (7).

Шаг 5. Расчет вероятности  $B(a, L)$  блокировки информационной пачки по формуле (8).

### 3. Имитационная модель протокола JET.

Для анализа вероятности блокировки информационной пачки в зависимости от задержки  $a$  и средней длины информационной пачки  $L$  была разработана программа имитационного моделирования в системе моделирования общего назначения (General Purpose Simulation System, GPSS).

Имитационная модель представляет собою разомкнутую сеть массового обслуживания, состоящую из двух узлов. Из внешней среды в узел 1 поступает простейший поток заявок заданной интенсивности. Длительность обслуживания в первом узле – равномерно распределенная случайная величина, моделирующая задержку между моментами поступления КП и ИП. После обслуживания в первом узле заявки с вероятностью  $P=1$  переходят на обслуживание в узел 2. Длительность обслуживания во втором узле соответствует времени передачи информационной пачки, которая имеет случайную длину с геометрическим распределением. Моделирование резервирования длины волны осуществляется при помощи блока ADVANCE, дисциплина выбора LIFO – при помощи оператора UNLINK. На рис. 4 представлен листинг программы имитационного моделирования.

```

Uz_1 STORAGE 2; задания число приборов в узле
GENERATE (Exponential(1,0,1800)); формирование детерминированного потока заявок
TEST L Q$ch_2,1,Otkaz; проверка длины очереди ch_2
Met_1 QUEUE ch_1; отметка момента поступления заявки в очередь ch_1
UNLINK B Met_1; очередьность очереди ch_1
ENTER Uz_1; попытка занять один из приборов устройства Uz_1
DEPART ch_1; регистрация момента покидания заявки очереди ch_1
ADVANCE (Uniform(25,1,1800)); формирование задержки, распределенной по равномерному закону
LEAVE Uz_1; освобождение одного прибора многоканального устройства Uz_1
TRANSFER ,Met 2; безусловная (с вероятностью 1) передача заявки в узел 2
Met_2 QUEUE ch_2;
SEIZE uzell;
DEPART ch_2;
ADVANCE (Exponential(1,0,1800));
RELEASE uzell;
TERMINATE 1;
Otkaz TERMINATE 1

```

Рис. 4. Программа моделирования работы протокола резервирования JET в GPSS

### 4. Пример численного анализа

Ниже приведены результаты расчета вероятности блокировки информационной пачки в зависимости от задержки  $a$  (рис. 5) и средней длины информационной пачки  $L$  (рис. 6). Вероятность блокировки была рассчитана тремя способами – с помощью математической модели (график «марковская модель»), имитационной модели (график «моделирование»), а также с помощью приближенного метода оценки по формуле вероятности блокировки для модели Эрланга с явными потерями [16] (график «формула Эрланга»):

$$B = \frac{(\lambda L)^w / w!}{\sum_{z=0}^w (\lambda L)^z / z!}. \quad (9)$$

Расчеты приводились для случая  $w=3$  при двух значениях задержки  $a=36$  слотов и  $a=90$  слотов, а также при двух значениях средней длины информационной пачки  $L=20500$  слотов и  $L=122000$  слотов. Заметим, что на практике число длин волн в оптическом канале измеряется тысячами – напр., используется 2048 длин волн.

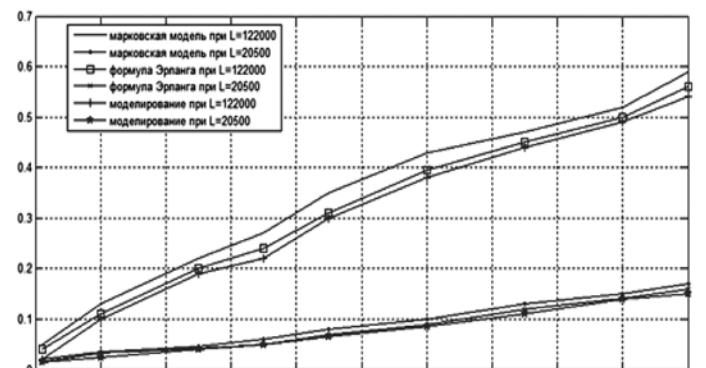
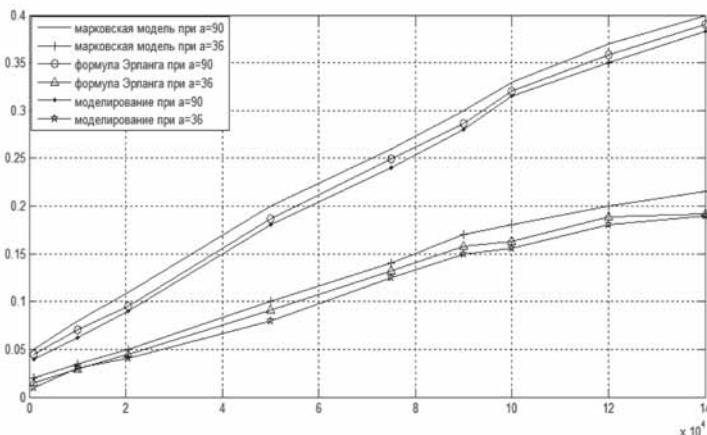


Рис. 5. Зависимость вероятности блокировки ИП от задержки  $a$



**Рис. 6.** Зависимость вероятности блокировки ИП от средней длины ИП  $L$

Графики рис. 5 показывают, что при средней длине ИП 20 500 тактов значения вероятностей блокировок ИП, вычисленные различными способами, близки – относительная погрешность не превышает 5%. Следовательно, для упрощения расчетов можно рекомендовать использовать формулу Эрланга.

При средней длине ИП 122 000 тактов марковская модель дает оценку сверху для вероятностей блокировок ИП. Эта же закономерность видна на графиках рис. 6, где для обоих значений задержки  $a = 36$  слотов и  $a = 90$  слотов наблюдается отличие вероятностей блокировки, полученных путем математического моделирования, от других методов, при этом формула (8) дает оценку сверху для вероятности блокировок ИП. На рис. 6 этот эффект становится выраженным при росте от средней длины информационной пачки до  $L = 10^5$  временных слотов, что также говорит в пользу расчетов по формуле (8) при проектировании сети оптической коммутации.

## 5. Заключение

Сети оптической пакетной коммутации с оптической коммутацией пакетов обладают возможностями для удовлетворения самых высоких требований по пропускной способности таких приложений, как распределенные вычисления (grid computing), IP-телевидение и облачные хранение и обработка данных (cloud computing). К сожалению, технология оптической коммутации пакетов пока не вышла на коммерческий рынок, что отчасти объясняется недостаточными усилиями по стандартизации соответствующих протоколов и сетевой архитектуры. Однако, научно-исследовательская работа в этой области ведется активно, в частности, разрабатываются схемы урегулирования коллизий, когда пришедшие по разным входящим оптическим каналам пакеты одновременно требуют одну длину волны в исходящем канале. При урегулировании коллизий могут применяться такие методы, как оптическая буферизация на основе волоконно-оптических линий задержки, различные преобразования длины волны (с полной, ограниченной фиксированной или частичной конверсией), альтернативная маршрутизация, фрагментация пакета. Задачей даль-

нейших исследований является моделирование передачи пакетов по цепочке оптических коммутаторов для анализа вероятности блокировки пачки как в отсутствии коллизий, так и с их учетом.

## Литература

1. Алексеев Е.Б. Основы проектирования и технической эксплуатации транспортных сетей на базе ЦСП и ВОСП. М.: Брис-М, 2012. 250 с.
2. Алексеев Е.Б., Булавкин И.А., Попов А.Г., Попов В.И. Пассивные волоконно-оптические сети. Проектирование, оптимизация и обнаружение несанкционированного доступа. М.: ООО «Издательский дом Медиа Паблишер», 2014. 206 с.
3. Андреев В.А., Портнов Э.Л., Кочановский Л.Н. Направляющие системы электросвязи: учебник для вузов. В 2-х томах, Том 1 – Теория передачи и влияния. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 424 с.: ил.
4. Андреев В.А., Бурдин А.В., Кочановский Л.Н. Направляющие системы электросвязи: учебник для вузов. В 2-х томах, Том 2 – Проектирование, строительство и техническая эксплуатация. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 424 с.: ил.
5. Безруков В.Н., Балобанов В.Г. Системы цифрового вещательного и прикладного телевидения. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2011. 608 с.: ил.
6. Гордиенко В.Н., Крухмалев В.В., Моченов А.Д., Шарафутдинов Р.М. Оптические телекоммуникационные системы. М.: Горячая линия – телеком, 2011. 368 с.: ил.
7. Гринфилд, Д. Оптические сети. К.: ООО «ТИД «ДС», 2002. 256 с.
8. Портнов Э.Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 544 с.: ил.
9. Venkatesh, T, Siva Ram Murthy, C An Analytical Approach to Optical Burst Switched Networks. Springer, USA, 2009, 262 p.
10. Башарин Г.П., Гудкова И.А., Шибаева Е.С. Математическая модель функционирования коммутатора в OBS сети с FDL и маршрутизацией с отклонением // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2013. № 11. С. 33.
11. Голышко А.В., Лескова Н.А. Оптическая коммутация блоков // Сети и системы связи, 2001, № 8, [Электронный ресурс] / Режим доступа: свободный (дата обращения 12.02.2015) [http://www.ccc.ru/magazine/depot/01\\_08/read.html?0302.htm](http://www.ccc.ru/magazine/depot/01_08/read.html?0302.htm).
12. Ершова Э.Б., Вакс Э.М. К вопросу построения оптических сетей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2009. Спецвыпуск. С. 14-17.
13. Kirci, P, Zaim, AH 2006, 'Comparison of OBS protocols', In Proc. of International Symposium on Computer Networks, Istanbul, Turkey, pp. 158-161.
14. Pinar Kirci, Halim Zaim, A 2006, 'Just-in-time, just-enough-time and horizon signalling protocols on optical burst switches', Int. J. Optica Applicata, Wroclaw, Poland, Vol.36, No.1, pp. 111-123.
15. Система имитационного моделирования общего назначения General Purpose Simulation System [Электронный ресурс] / Режим доступа: свободный (дата обращения 12.02.2015) <http://www.gpss.ru>.
16. Kaheel, A, Alnuweiri, H, Gebali, F 2004, 'Analytical evaluation of blocking probability in optical burst switching networks', In Proc. of IEEE International Conference on Communications, Paris, France, Vol. 3, pp. 1548-1553.

## OPTICAL SWITCH MODELLING IN OPTICAL BURST SWITCHING NETWORK WITH PROTOCOL JET

**Mironov Yury**, Moscow, Russia, [mistiam@gmail.com](mailto:mistiam@gmail.com)

**Buzhin Igor**, Moscow, Russia, [bigvrn93@mail.ru](mailto:bigvrn93@mail.ru)

**Gaidamaka Yuliya**,

*Peoples' Friendship University of Russia, Department of applied probability and informatics, associate professor, Moscow, Russia,  
[ygaidamaka@mail.ru](mailto:ygaidamaka@mail.ru)*

### **Abstract**

Optical packet switching (OPS) combines the advantages of optical networks with wavelength routing and packet-switched networks. Applying the principle of optical burst switching (OBS) required the development of specialized signaling protocols, one of which is the wavelength reservation protocol JET (Just-Enough-Time) with delayed reservation. JET and Just-In-Time (JIT) are the two of main TAG (Tell-And-Go) signaling protocols. In JET, first the burst header packet (BHP) arrives at the optical switch on the control wavelength. After the BHP is processed, the wavelength on which the data burst is due to arrive is scheduled for use only after the offset time for the duration of the data burst. This mechanism increases the utilization of the wavelength in comparison with other signaling schemes such as JIT and Horizon. In this paper the mathematical model of the optical switch in optical burst switching network with JET protocol is investigated. The model has the form of in-homogeneous Markov chain with transition matrix depending on the intensity of BHP arrivals, offset time distribution and the data burst duration distribution. The formula for calculating the blocking probability of data burst for the uniform offset time distribution and the geometric distribution of data burst duration is proposed. In addition, the simulation model of JET protocol in the General Purpose Simulation System (GPSS) is developed. The paper presents the results of numerical analysis both for mathematical modelling and simulation.

**Keywords:** Optical Packet Switching (OPS), Optical Burst Switching (OBS), Just Enough Time (JET).

### **References**

1. Alekseev, EB 2012, 'Bases of design and technical operation of transport networks on the basis of digital transmission systems and fibre optical transmission systems'. Moscow: Bris-M, 250 p., 26 il., bibl. 128.
2. Alekseev, EB, Bulavkin, IA, Popov, AG, Popov, VI 2014, 'Passive fiber-optical networks. Design, optimization and detection of unauthorized access'. Moscow: " Media Publisher ", 206 p.
3. Andreev, VA, Portnov, EL, Konchanovskiy, LN 2009, 'The directing systems in telecommunications: the textbook for high school. Vol.1 – Theory of transfer and influence. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom, 424 p.
4. Andreev, VA, Burdin, AV, Konchanovskiy, LN 2009, 'The directing systems in telecommunications: the textbook for high school. Vol.2 – Design, construction and technical operation, M.: Goryachaya liniya – Telecom, 424 p.
5. Bezrukov, VN, Balobanov, VG 2011, 'Systems of digital broadcasting and applied television. Manual for high school, M.: Goryachaya liniya – Telecom, 608 p.
6. Gordienko, VN, Kruckhmalev, VV, Mochenov, AD, Sharaphutdinov, RM 2011, 'Optical telecommunication systems'. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom, 368 p.
7. Greenfield, D 2001, 'The Essential Guide to Optical Networks', Pearson Education; 1st edition, 256 p.
8. Portnov, EL 2009, 'Principles of primary networks construction and fiber optic links. Manual for high school'. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom, 544 p.
9. Venkatesh, T, Siva Ram Murthy, C 2009, 'An Analytical Approach to Optical Burst Switched Networks', Springer, USA, 262 p. (in Russian)
10. Basharin, GP, Gudkova, IA, Shibaeva, ES 2013, 'A mathematical model of switch working in OBS network with FDL and deflection routing', T-Comm, No.11, p. 33. (in Russian)
11. Golyshko, AV, Leskova, NA 2001, Optical packet switching. Networks and communication systems', No.8, (viewed 12.02.2015) Available at: [http://www.ccc.ru/magazine/depot/01\\_08/read.html?0302.htm](http://www.ccc.ru/magazine/depot/01_08/read.html?0302.htm).
12. Ershova, EB, Vaks, EM 2009, About creation of optical networks', T-Comm, special issue, pp. 14-17.
13. Kirci, P, Zaim, AH 2006, 'Comparison of OBS protocols', In Proc. of International Symposium on Computer Networks, Istanbul, Turkey, pp. 158-161.(in Russian)
14. Pinar Kirci, Halim Zaim, A 2006, 'Just-in-time, just-enough-time and horizon signalling protocols on optical burst switches', Int. J. Optica Applicata, Wroclaw, Poland, Vol.36, No.1, pp. 111-123. (in Russian)
15. 'General Purpose Simulation System' (viewed 12.02.2015) Available at: <http://www.gpss.ru>. (in Russian)
16. Kaheel, A, Alnuweiri, H, Gebali, F 2004, 'Analytical evaluation of blocking probability in optical burst switching networks', In Proc. of IEEE International Conference on Communications, Paris, France, Vol. 3, pp. 1548-1553. (in Russian)