
Математическая теория телетрафика и сети телекоммуникаций

УДК 621.39

Анализ восходящего потока трафика в пассивных оптических сетях

Г. П. Башарин, Н. В. Русина

*Кафедра систем телекоммуникаций
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198*

В настоящее время эволюция сетей доступа идёт по двум основным направлениям: развитие высокоскоростного доступа для предоставления услуг с высоким уровнем качества обслуживания и уменьшение доли медных кабелей при организации местных сетей. Технология пассивных оптических сетей является быстроразвивающейся и наиболее перспективной технологией высокоскоростного мультисервисного множественного доступа по оптическому волокну. Суть её состоит в том, что распределительная сеть технологии строится с использованием пассивных оптоволоконных разветвителей/смесителей, что определяет ряд преимуществ: снижение стоимости системы доступа, уменьшение объёма сетевого управления, высокая дальность передачи и отсутствие необходимости в последующей модернизации сети. Применение классической мультисервисной модели Эрланга для расчётов параметров качества обслуживания в пассивной оптической сети становится затруднительным в силу специфических особенностей процесса функционирования оптических сетевых абонентских устройств. В работе представлена мультисервисная модель передачи восходящего потока трафика с учётом процесса функционирования оптических сетевых абонентских устройств, который моделируется ступенчатым Марковским процессом с интенсивностью перехода каждого оптического сетевого абонентского устройства из состояния передачи данных в неактивное состояние и наоборот. Результаты анализа процесса применяются в анализе вероятностно-временных характеристик предложенной модели.

Ключевые слова: пассивная оптическая сеть, оптический терминал, оптическое сетевое абонентское устройство, пассивный оптоволоконный разветвитель/смеситель, восходящий поток трафика, мультиплексирование с разделением по длине волны, множественный доступ с разделением по времени, вероятностно-временные характеристики.

1. Введение

Технология пассивных оптических сетей (PONs, Passive Optical Networks) начинает своё развитие с 1995 г., когда группа из семи компаний (British Telecom, France Telecom, Deutsche Telecom, NTT, KPN, Telefonica и Telecom Italia) основала консорциум (FSAN, Full Service Access Network). Целью организации является разработка основ для стандартизации технологии PON и активное выведение её на рынок. В настоящее время при активном участии FSAN были определены разновидности PON, основные из которых впоследствии были стандартизованы Международным союзом электросвязи [1].

PON — это архитектура оптического доступа [2, гл. 9], [3, §7.5–§7.6], [4, 5], [6, §5.2], которая обеспечивает передачу различных классов сетевого трафика (голос, данные и видео) между оптическим терминалом (OLT, Optical Line Terminal) и оптическими сетевыми абонентскими устройствами (ONU, Optical Network Units) через пассивные оптоволоконные разветвители/смесители (PO-SC, Passive Optical Splitter/Combiner).

В работе рассматривается процесс функционирования ONUs в PON. Полученный результат применяется для анализа вероятностно-временных характеристик мультисервисной модели передачи трафика от некоторого ONU к OLT.

2. Архитектура и принципы функционирования PON

PON обеспечивает передачу различных классов сетевого трафика между OLT и ONUs без использования каких-либо активных оптоэлектронных компонентов (рис. 1). Для передачи данных в PON используются PO-SC. OLT размещается в центральном офисе (CO, Central Office) и соединяет оптическую сеть доступа с городской региональной сетью (MAN, Metropolitan Area Network) или с глобальной сетью (WAN, Wide Area Network). ONU размещается либо на стороне пользователя (FTTH, Fiber To The Home, или FTTB, Fiber to The Building), либо в зоне разветвления (FTTC, Fiber To The Curb). ONUs могут быть удалены от OLT на расстояние до 20 км [6, §5.2], [1, 7–9].

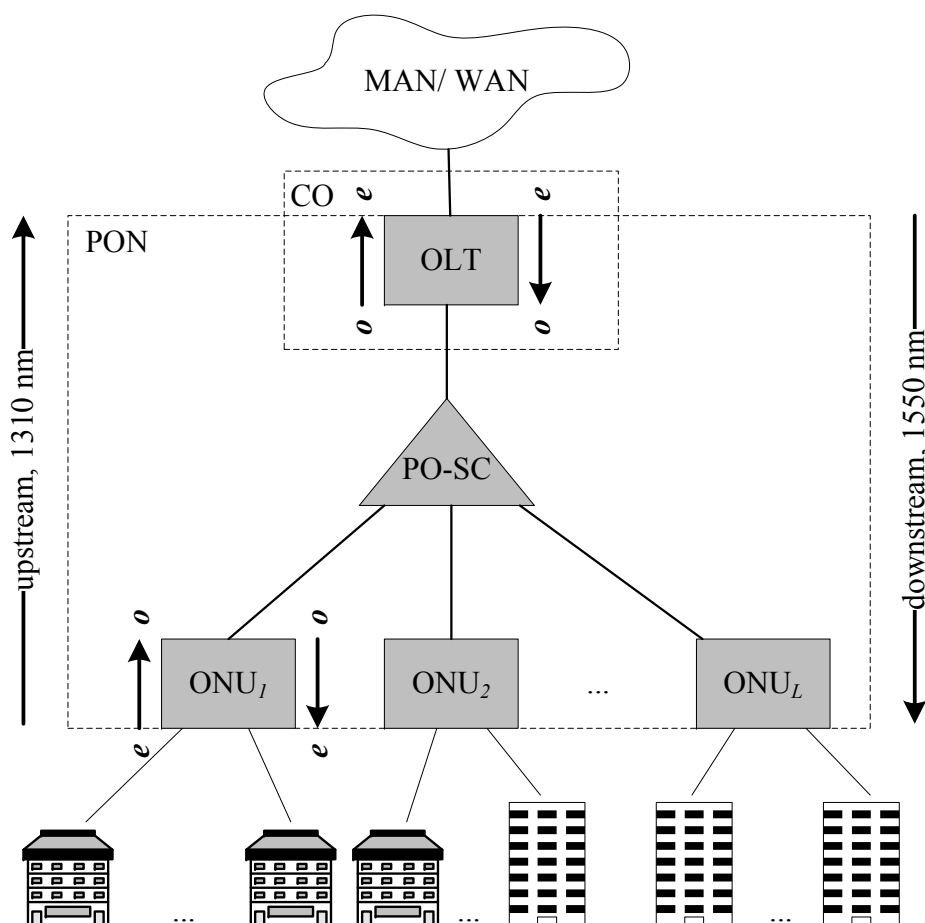


Рис. 1. Архитектура PON

PO-SC передаёт трафик от OLT к ONUs (downstream, нисходящий поток трафика) и от ONUs к OLT (upstream, восходящий поток трафика) через одно оптоволокно. Чтобы разделить нисходящий и восходящий поток трафика при использовании одного оптоволокна, выделяют различные длины волн для каждого направления.

Для передачи трафика в рамках одного направления может использоваться технология мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM, Wavelength Division Multiplexing). В WDM PON определён набор длин волн для каждого направления

$$W_{\text{up}} := \{\omega_{\text{up},i} | 1 \leq i < \infty\}, \quad W_{\text{down}} := \{\omega_{\text{down},j} | 1 \leq j < \infty\}. \quad (1)$$

Также в WDM PON в качестве PO-SC используется дифракционная решётка на волноводном массиве (Array Waveguide Grating, AWG), которая мультиплексирует/демультиплексирует длины волн.

Наиболее экономически выгодным оказывается использование одной длины волны для передачи восходящего потока трафика и одной длины волны для передачи нисходящего потока трафика [6, §5.2], [7, 9]

$$W_{\text{up}} := \{1310\text{nm}\}, \quad W_{\text{down}} := \{1550\text{nm}\}. \quad (2)$$

В этом случае в процессе передачи потока трафика любого направления применяется технология множественного доступа с разделением по времени (Time Division Multiple Access, TDMA) [6, §5.2], [9]. Передача нисходящего потока трафика осуществляется всем без исключения ONU. Однако принимается он только тем ONU, для которого предназначен.

В TDMA PON (рис. 2) каждому ONU выделяется определённый временной домен, единицей изменения которого является временной слот. ONU должно буферизовать полученные от клиента данные до тех пор, пока не начнётся его временной домен. Когда начинается его временной домен, ONU передаёт накопленные в буфере данные с максимальной канальной скоростью. Аналогично OLT должно буферизовать полученные для ONU данные до тех пор, пока не начнётся временной домен, определённый этому ONU. Когда начинается этот временной домен, OLT передаёт накопленные в буфере данные с максимальной канальной скоростью.

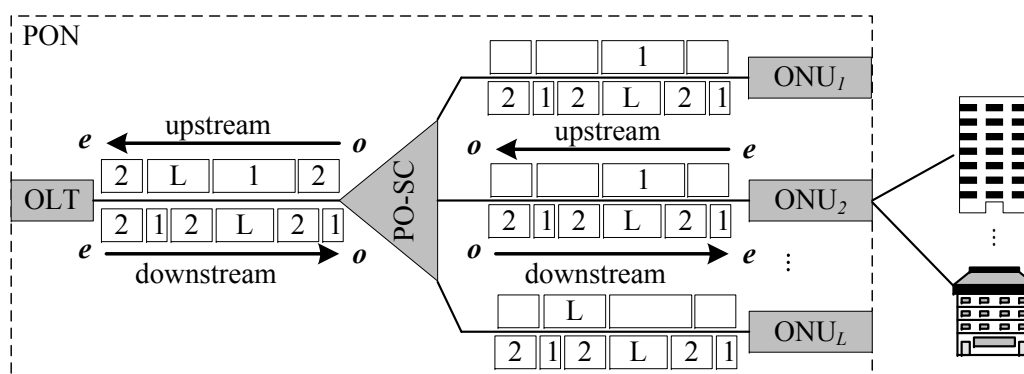


Рис. 2. TDMA PON

Таким образом, ONU может находиться в состоянии ON, т.е. быть активным и осуществлять передачу к OLT и/или получение от OLT данных в выделенном ему временном домене, или в состоянии OFF, т.е. находиться в состоянии «сна», при котором передача к OLT и/или получение от OLT данных приостановлена.

Далее в статье рассматривается передача только восходящего потока трафика. Аналогичные рассуждения могут быть применены для нисходящего потока трафика.

3. Модель функционирования ONU в PON

Рассмотрим фрагмент WDM-TDMA PON [7], который содержит L ONUs и в котором для передачи восходящего потока трафика выделено множество длин волн

$$W_{\text{up}} := \{\omega_{\text{up},i} \mid i = \overline{1, F}\}, \quad F \leq L. \quad (3)$$

Совместное функционирование устройств будем описывать с помощью ступенчатого марковского процесса СтМП $\vec{X}(t) = (X_l(t))_{l=\overline{1, L}}$, где $X_l(t)$ — состояние ONU $_l$, в момент времени $t > 0$. Здесь $X_l(t) = 1 \iff \text{ONU}_l, l = \overline{1, L}$, находится в состоянии ON; $X_l(t) = 0 \iff \text{ONU}_l, l = \overline{1, L}$, находится в состоянии OFF; $\vec{n} := (n_l)_{l=\overline{1, L}}$, $n_l \in \{0, 1\}$ — вектор состояний системы; $\Omega := \{\vec{n} \mid n_{\bullet} \in \{0, 1, \dots, F\}\}$, $n_{\bullet} := \vec{1}^T \vec{n} = \sum_{i=1}^L n_i$ — пространство всех возможных состояний. Тогда

$$|\Omega| = 1 + \sum_{f=1}^F \binom{L}{f} = \sum_{f=0}^F \binom{L}{f}. \quad (4)$$

Для аналогичного фрагмента TDMA PON (частный случай при $F = 1$), когда в одном временном слоте передачу и получение данных может осуществлять только одно ONU либо не осуществляет ни одно из имеющихся ONUs, имеем

$$|\Omega| = L + 1. \quad (5)$$

Диаграмма интенсивностей переходов для ONU $_l, l = \overline{1, L}$, приведена на рис. 3.

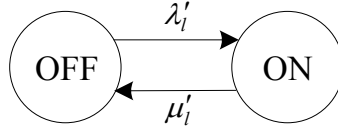


Рис. 3. Схема переходов между состояниями для ONU $_l, l = \overline{1, L}$

Обозначим $P_{l,\text{off}}$ и $P_{l,\text{on}}$ — стационарные вероятности того, что ONU $_l, l = \overline{1, L}$, находится в состоянии OFF или ON, соответственно. Тогда систему уравнений частичного баланса (СУЧБ) для процесса, описывающего состояние одного ONU $_l$, можно записать в виде

$$P_{l,\text{off}} \cdot \lambda'_l = P_{l,\text{on}} \cdot \mu'_l, \quad l = \overline{1, L}. \quad (6)$$

Отсюда получаем формулы для стационарных вероятностей

$$P_{l,\text{off}} = \frac{1}{1 + \rho'_l} := 1 - \alpha_l, \quad (7)$$

$$P_{l,\text{on}} = \frac{\rho'_l}{1 + \rho'_l} := \alpha_l.$$

Здесь $\rho'_l := \frac{\lambda'_l}{\mu'_l}$, $l = \overline{1, L}$.

Примеры переходов процесса $\vec{X}(t)$ представлены на рис. 4.

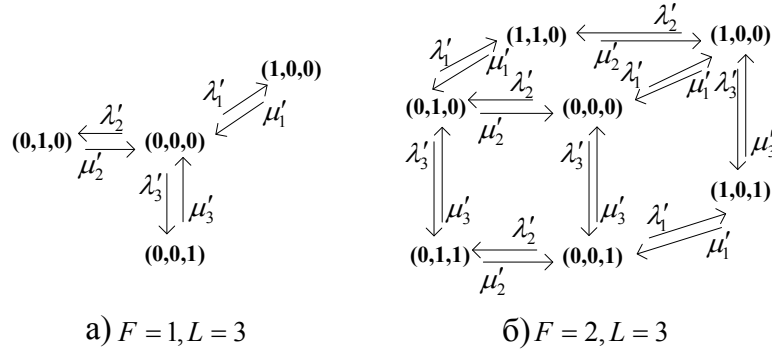


Рис. 4. Примеры переходов процесса $\vec{X}(t)$

Для СМО выполняется условие

$$\alpha_{\bullet} := \sum_{l=1}^L \alpha_l \leq F. \tag{8}$$

Тогда для $F = 1$

$$\alpha_{\bullet} \leq 1. \tag{9}$$

4. Модель передачи восходящего потока трафика

Рассмотрим процесс передачи восходящего потока трафика в TDMA PON, которая содержит L ONUs (рис. 5).

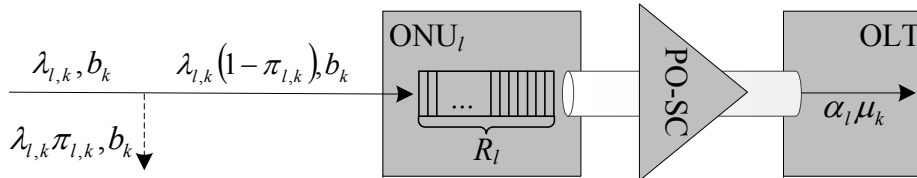


Рис. 5. Модель передачи восходящего потока трафика для $\text{ONU}_l, l = \overline{1, L}$, по k -заявке, $k = \overline{1, K}$

Каждое ONU_l имеет накопитель длины R_l временных слотов, $0 < R_l < \infty, l = \overline{1, L}$. Исследуемая СМО обслуживает K типов заявок. Потоки поступления k -заявок любого класса на ONU_l пуассоновские с постоянными интенсивностями $\lambda_{l,k}, 0 < \lambda_{l,k} < \infty, l = \overline{1, L}, k = \overline{1, K}$, и независимы в совокупности для каждого ONU_l . Каждая k -заявка требует для своего обслуживания $b_k, k = \overline{1, K}$, временных слотов, которые занимают в накопителе на время её обслуживания и освобождаются сразу после завершения обслуживания вместе с освобождением длины волны.

Если в момент поступления новой k -заявки, $k = \overline{1, K}$, в $\text{ONU}_l, l = \overline{1, L}$, оказались заняты больше, чем $R_l - b_k$ мест в очереди, то поступившая k -заявка получает отказ и теряется, не влияя на интенсивность поступления породившего её пуассоновского потока.

Время обслуживания k -заявки в ONU_l имеет экспоненциальное распределение с параметром $\mu_k, k = \overline{1, K}$. Однако необходимо учесть процесс функционирования $\text{ONU}_l, l = \overline{1, L}$, которое осуществляет передачу данных только в определённые

временные домены, и тем самым может находиться в состоянии, когда передача полностью прекращена. Тогда интенсивность обслуживания k -заявки, учитывая особенность функционирования ONU_l , примет вид

$$\alpha_l \cdot \mu_k, \quad l = \overline{1, L}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (10)$$

Здесь и далее α_l — вероятность того, что ONU_l , $l = \overline{1, L}$, находится в состоянии ON в некоторый момент времени $t > 0$.

Для формального описания модели необходимо задать параметры, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели

Параметр	Описание
$\vec{R} := (R_l)_{l=\overline{1, L}}$	вектор длин накопителей;
$\mathbf{\Lambda} := (\lambda_{l,k})_{l=\overline{1, L}, k=\overline{1, K}}$	матрица интенсивностей поступления заявок;
$\vec{b} := (b_k)_{k=\overline{1, K}}$	вектор требований к числу временных слотов для обслуживания заявок;
$\vec{\mu} := (\mu_k)_{k=\overline{1, K}}$	вектор интенсивностей обслуживания заявок;
$\vec{\alpha} := (\alpha_l)_{l=\overline{1, L}}$	вектор вероятностей нахождения ONUs в состоянии ON.

5. Описание СтМП и пространства состояний

Функционирование СМО будем описывать с помощью СтМП матричной формы $\mathbf{Y} := (Y_{l,k}(t))_{l=\overline{1, L}, k=\overline{1, K}}$, $t > 0$, где $Y_{l,k}(t)$ — число k -заявок в ONU_l , в момент времени $t > 0$.

Матрица состояний системы

$$\mathbf{M} := (m_{l,k})_{l=\overline{1, L}, k=\overline{1, K}}, \quad m_{l,k} \in \left\{ 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{R_l}{b_k} \right\rfloor \right\}. \quad (11)$$

Пространство всех возможных состояний системы

$$S := \left\{ \mathbf{M} \mid 0 \leq \sum_{k=1}^K b_k m_{l,k} \leq R_l, l = \overline{1, L} \right\}. \quad (12)$$

Подпространство приёма и блокировки k -заявок, $k = \overline{1, K}$, для ONU_l , $l = \overline{1, L}$, соответственно,

$$S_{l,k} := \left\{ \mathbf{M} \in S \mid \sum_{k=1}^K b_k m_{l,k} \leq R_l - b_k \right\}, \quad (13)$$

$$\bar{S}_{l,k} := \left\{ \mathbf{M} \in S \mid \sum_{k=1}^K b_k m_{l,k} > R_l - b_k \right\}.$$

Диаграмма интенсивностей переходов для произвольного ONU_l , $l = \overline{1, L}$, приведена на рис. 6.

СУЧБ по каждой из k -заявке, для произвольного ONU_l будет иметь вид

$$p(\mathbf{M}) \cdot \alpha_l \cdot \mu_k = p(\mathbf{M} - \mathbf{E}_{l,k}) \cdot u(m_{l,k}) \cdot \lambda_{l,k}, \quad \mathbf{M} \in S, \quad l = \overline{1, L}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (14)$$

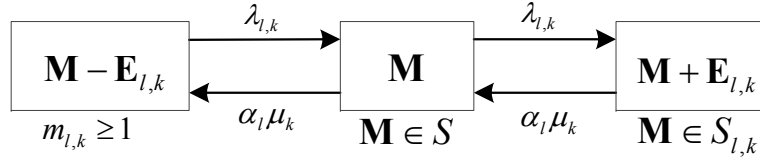


Рис. 6. Схема переходов между состояниями для ONU_l , $l = \overline{1, L}$, по k -заявке, $k = \overline{1, K}$

Тогда

$$p(\mathbf{M}) = p(\mathbf{0}) \cdot \prod_{l=1}^L \frac{1}{\alpha_l^{m_{l,\bullet}}} \prod_{k=1}^K \rho_{l,k}^{m_{l,k}}, \quad \frac{1}{p(\mathbf{0})} = \sum_{\mathbf{M} \in S} \prod_{l=1}^L \frac{1}{\alpha_l^{m_{l,\bullet}}} \prod_{k=1}^K \rho_{l,k}^{m_{l,k}}, \quad (15)$$

Здесь $\mathbf{M} \in S$, $\rho_{l,k} := \frac{\lambda_{l,k}}{\mu_k}$, $k = \overline{1, K}$, $m_{l,\bullet} := \sum_{k=1}^K m_{l,k}$, $l = \overline{1, L}$.

Вероятность потерь k -заявок для ONU_l

$$\pi_{l,k} = \sum_{\mathbf{M} \in \bar{S}_{l,k}} p(\mathbf{M}), \quad k = \overline{1, K}, \quad l = \overline{1, L}. \quad (16)$$

6. Пример численного анализа

Рассмотрим пример численного анализа математической модели восходящего потока трафика в TDMA PON.

Таблица 2

Значения параметров модели

Параметр	Значение
K	2
\vec{b}^T	(1, 2)
L	2
\vec{R}^T	(10, 10)
$\vec{\alpha}^T$	$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, 0.3 \leq \alpha_1 \leq 0.6$
Λ	$\begin{pmatrix} 0.8 & 0.16 \\ 1 & 0.3 \end{pmatrix}$
$\vec{\mu}^T$	(4, 2)
ВВХ	$\pi_{l,k}, l, k = \overline{1, 2}$

Исследуется зависимость $\pi_{l,k}$, $l, k = \overline{1, 2}$, от α_1 . Из графиков, представленных на рис. 7, следует, что за счёт настройки параметра, учитывающего процесс функционирования ONUs, можно оптимизировать их работу и уменьшить вероятности блокировки по каждому типу заявок для каждого ONU.

7. Заключение

В настоящей статье предложены точные формулы расчёта ВВХ математической модели передачи восходящего потока трафика в TDMA PON. Также приводится пример численного анализа, в котором отражена роль параметра α_l , $l = \overline{1, L}$, при выборе оптимального режима функционирования сети.

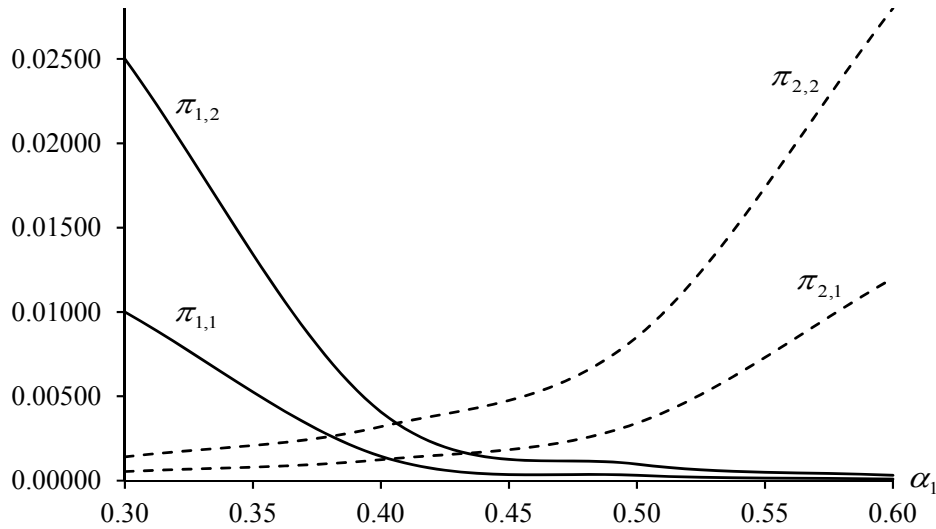


Рис. 7. Зависимость вероятностей блокировки $\pi_{l,k}$, $l, k = \overline{1,2}$, от α_1

Авторы предполагают использовать идею представленного в статье подхода для анализа вероятностно-временных характеристик восходящего потока трафика в OCDMA PON [8].

Литература

1. ITU-T. Recommendation G.984.1. Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics. Rev.1. — 2008.
2. Гринфилд Д. Оптические сети, пер. с англ. — Киев: ДиаСофтЮП, 2002. [Greenfield D. Optical Networks. — Kiev: DiaSoftUP, 2002. — (in russian).]
3. Башарин Г. П. Лекции по математической теории телетрафика. Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: РУДН, 2009. [Basharin G.P. Lectures on Mathematical Teletraffic Theory. The 3-rd edition. — Moscow: PFUR, 2009. — (in russian).]
4. Наумов В. А., Самуйлов К. Е., Яркина Н. В. Теория телетрафика мультисервисных сетей. Монография. — М.: РУДН, 2008. [Naumov V. A., Samuilov K. Y., Yarkina N. V. Teletraffic Theory of Multiservice Networks. Monography. — Moscow: PFUR, 2008. — (in russian).]
5. Ефимушкин В. А., Савандюков И. М. Распределение ресурсов в оптических транспортных сетях: Учебное пособие. — М.: ЦНИИС, 2010. [Ephimyshkin V. A., Savandukov I. M. Resource Distribution in Optical Transport Networks: Study Guide. — Moscow: CSE, 2010. — (in russian).]
6. Mukherjee B. Optical WDM Networks. — Springer, 2006.
7. An Analytical Approach for Dynamic Wavelength Allocation in WDM-TDMA PONs Servicing ON-OFF Traffic / J. S. Vardakas, I. D. Moscholios, M. D. Logothetis, V. G. Stylianakis // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking. — 2011. — Vol. 3, No 4. — Pp. 347–358.
8. Blocking Performance of Multi-Rate OCDMA Passive Optical Networks / J. S. Vardakas, I. D. Moscholios, M. D. Logothetis, V. G. Stylianakis // The Third International Conference on Emerging Network Intelligence. — 2011. — Pp. 125–130.
9. Семёнов Ю. А. Пассивные оптические сети (PON/EPON/GEPON) // Телекоммуникационные технологии. — <http://book.itep.ru/4/41/pon.htm>. [Semenov Yu. Passive Optical Networks (PON/EPON/GEPON) // Telecommunication Technologies, 2009. — <http://book.itep.ru/4/41/pon.htm>. — (in russian).]

UDC 621.39

Upstream Traffic Analysis in Passive Optical Networks**G. P. Basharin, N. V. Rusina***Telecommunication Systems Department
Peoples' Friendship University of Russia
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russia, 117198*

Nowadays, access network evaluation is being conducted in both directions, such as high bit rate access development for providing high quality of service and decrease length of cooper wiring in local line networks. Rapidly developing passive optical network (PON) technology is a future optical technology that enables high-speed data transfer of multiservice traffic using optical fibers. The distribution network of the technology uses passive optical splitter/combiner. There are several advantages, such as cost duration of the access system, volume reduction of the network control, long transmitting distance and no need for the following network upgrade. The use of a classical Erlang multiservice model for the modeling of a PON is restricted due to a specific functioning process of the optical network units (ONUs). In the present paper, we propose an upstream traffic multiservice model considering the functioning process of ONUs. The functioning of an ONU is modeled by the step Markov process with the transition rate of each ONU ON to OFF-state and vice versa. These results are used in the blocking probability analysis of the model.

Key words and phrases: Passive Optical Network (PON), Optical Line Terminal (OLT), Optical Network Unit (ONU), Passive Optical Splitter/Combiner (PO-SC), upstream, Wavelength Division Multiplexing (WDM), Time Division Multiple Access (TDMA), blocking probability.