



Методы анализа и синтеза коммутационных схем фотонных коммутаторов на примере схемы Шпанке



Николай КАЗАНСКИЙ



Полина ЛЫСЮК

**Николай Александрович Казанский¹,
Полина Игоревна Лысюк²**

¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия.

² Колледж связи № 54 имени П. М. Вострухина, Москва, Россия.

✉ nkazan@inbox.ru.

АННОТАЦИЯ

Развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта требует внедрения новых телекоммуникационных технологий, реализованных в интегрированной цифровой системе технологической связи (ИЦТС). Одной из особенностей построения таких систем является обеспечение коммутации оптических каналов данных с использованием фотонных коммутаторов (ФК). Процессы коммутации в ФК происходят на фотонном (оптическом) уровне. Особенностью построения ФК является использование многозвенных топологий, выполненных на бинарных коммутаторах (БК). БК представляет собой простейший коммутационный элемент с количеством входных/выходных портов, равным одному или двум. Концепции построения ФК основаны на технологиях известных коммутационных схем на БК, которые, как правило, носят фамилии их создателей (схемы Бенеша, Шпанке, Шпанке–Бенеша, сеть Клоза и др.).

С увеличением ёмкости ФК усложняется его структура: увеличиваются число звеньев в схеме коммутации, общее число БК, длина маршрутов коммутации, коэффициент избыточности. Кроме того, возникает необходимость расчё-

та вероятностей возникновения внутренних блокировок в коммутационных схемах, скорости коммутации оптических сигналов, величины затухания оптического сигнала в схеме ФК и т.д.

Целью исследования является разработка методов анализа и синтеза коммутационных схем фотонных коммутаторов на примере схем Шпанке заданной ёмкости с учётом вероятностей возникновения внутренних блокировок. В статье авторами использованы общенаучные и инженерные методы математического моделирования, теории вероятностей и массового обслуживания. В качестве примера авторами рассмотрен алгоритм анализа структур схем Шпанке с ёмкостью от 4×4 до 128×128 . Определены их топологические и вероятностные характеристики (число звеньев в схеме коммутации, общее число БК, длины маршрутов коммутации, вероятности возникновения внутренних блокировок в схемах ФК). Результаты расчётов представлены в форме таблиц. Разработанные методы анализа и синтеза могут применяться при исследовании подобных коммутационных схем, построенных на БК.

Ключевые слова: фотонная коммутация, бинарный коммутатор, структура Шпанке, структурные характеристики, вероятности возникновения внутренних блокировок, высокоскоростной транспорт.

Для цитирования: Казанский Н. А., Лысюк П. И. Методы анализа и синтеза коммутационных схем фотонных коммутаторов на примере схемы Шпанке // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 5 (96). С. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-5-2>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта требует внедрения новых телекоммуникационных технологий, реализованных в интегрированной цифровой системе технологической связи (ИЦТС). Одной из особенностей построения таких систем является обеспечение коммутации оптических каналов передачи данных с использованием фотонных коммутаторов (ФК). Различным аспектам данного вопроса на протяжении целого ряда лет посвящаются многочисленные исследования [1–8].

ФК являются одними из основных элементов таких систем и позволяют конфигурировать их топологию. Процессы коммутации сигналов в ФК происходят на фотонном (оптическом) уровне. Особенностью построения ФК с числом входов/выходов от 4×4 и более является использование многосвязных топологий, выполненных на бинарных коммутаторах (БК). БК представляет собой простейший коммутационный элемент с количеством входов/выходов 2×2 , 2×1 или 1×2 .

В [9; 10] предложено строить схемы ФК по структурам классических схем, названным, как правило, по фамилиям их создателей:

- схема Шпанке;
- «матричная» схема;
- схема «Дельта»;
- схема «Баньян»;
- схема «Бетчер–Баньян»;
- схема Бенеша;
- схема Шпанке–Бенеша;
- схема Клоза (Клоса).

С увеличением ёмкости ФК усложняется его структура: увеличиваются число звеньев в схеме коммутации, общее число БК, длина маршрутов коммутации, коэффициент избыточности [11]. Кроме того, возникает необходимость расчёта вероятностей возникновения внутренних блокировок в коммутационных схемах, скорости коммутации оптических сигналов, величин затухания оптического сигнала в схеме ФК и т.д. В работах [9–12] приведены принци-

пы работы ФК, их технические характеристики и особенности построения структурных схем. Однако авторами не рассмотрены вопросы анализа и синтеза структурных схем ФК, не приведены методы расчёта их структурных и вероятностных характеристик.

Цель исследования. Разработка методов анализа и синтеза коммутационных схем ФК на примере схем Шпанке ёмкостью $M = 2^N$ и методов расчёта их структурных и вероятностных характеристик.

Методы исследования. Общенаучные и инженерные методы математического моделирования, теории вероятностей и массового обслуживания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагается рассматривать структуры многосвязных ФК с числом входов/выходов $M \times M$, формирующихся по модульному принципу, то есть исходя из того, что коммутационная схема ёмкостью $M \times M$ формируется на основе коммутационных схем с числом входов/выходов, равным $M/2 \times M/2$.

В соответствии с предлагаемым модульным принципом построения коммутационных схем Шпанке необходимо рассмотреть особенности структур схем минимальной ёмкости 2×2 с последующим увеличением этой ёмкости по закону $M = 2^N$. На рис. 1 приведена схема Шпанке минимальной ёмкости 2×2 [13].

Любую схему коммутации Шпанке ёмкости $M = 2^N$, где $N = 2, 3, 4, \dots$, можно представить в виде трёхзвенной схемы. При этом БК первого и третьего звена представляют собой входные и выходные БК типа 1×2 и 2×1 , а БК второго звена представляют собой блоки ёмкостью $M/4$.

Для анализа и синтеза структурных схем ФК ёмкостью M введём ряд определений.

Звено БК – совокупность БК, которые относятся к одной ступени коммутации. Звенья в схеме Шпанке подразделяются на оконечные и промежуточные. В коммутационной схеме Шпанке ёмкостью 2×2 нет промежуточных звеньев (рис. 1). Оконечные звенья строятся на БК типа 1×2 и 2×1 , промежуточное звено состоит из четырёх блоков ёмкостью $M/2$.

Блок БК – коммутационная схема ёмкостью $M/2$, на основе которой строятся коммутационные схемы ёмкостью M . При этом, в схемах Шпанке число блоков равно четырём

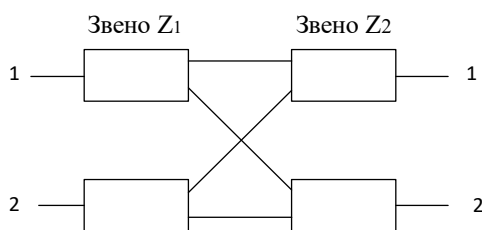


Рис. 1. Схема Шпанке 2×2 [13].

вне зависимости от ёмкости схемы. Блоки размещаются между первым и последним звеньями коммутатора.

Первое и третье звенья коммутационной схемы подразделяются на группы БК. Каждая группа состоит из $M/2$ базовых коммутаторов. Группам БК присвоена двойная нумерация. Первая цифра указывает на принадлежность к номеру звена (1 или 3), вторая цифра – порядковый номер группы в звене (1 или 2). Общее число групп в схемах Шпанке всегда равно четырём.

Введём следующие обозначения структурных характеристик схемы коммутатора Шпанке:

M – число входов/выходов в схеме коммутатора ($M = 2^N$);

Z_k – номер звена в схеме коммутатора, $k = 1, 2, 3$;

B_k – количество БК в звене Z_k схемы коммутатора – для $k = 1, 3$, $B_k = M$; для $k = 2$, $B_k = 2 \cdot M \cdot (M-2)$;

B – общее количество БК в схеме коммутатора;

G_{ij} – номер группы в схеме коммутатора, где $i = 1, 3$; $j = 1, 2$;

D_m – номер блока в звене Z_2 схемы коммутатора, $m = 1, 2, 3, 4$.

В качестве примера проведём анализ структурных характеристик схемы Шпанке ёмкостью 4×4 , представленной на рис. 2.

Звено $Z1$ реализуется на БК типа 1×2 , звено $Z2$ реализуется на БК типа 2×1 . Число БК в звеньях соответствует количеству входов (выходов) коммутатора. Звено $Z2$ содержит четыре блока ёмкостью 2×2 . Линиями разных типов (сплошными и пунктирными) изображены схемы подключения четырёх блоков ёмкостью 2×2 к БК звеньев $Z1$ и $Z3$. Звено $Z1$ состоит из групп $G11$ и $G12$, звено $Z3$ состоит из групп $G31$ и $G32$.

Авторами статьи предложен следующий обобщённый алгоритм анализа и синтеза коммутационных схем Шпанке ёмкостью $M = 2^N$:

1. Первоначально определяются:

- общее количество БК в схеме по формуле: $B = 2 \cdot M \cdot (M-1)$ [10];

- количество БК в первом звене B_1 и последнем звене B_3 в схеме коммутатора: $B_1 = B_3 = M$;

- общее количество БК в промежуточном звене $Z2$, вычисляется по формуле: $B_2 = 2 \cdot M \cdot (M-2)$.

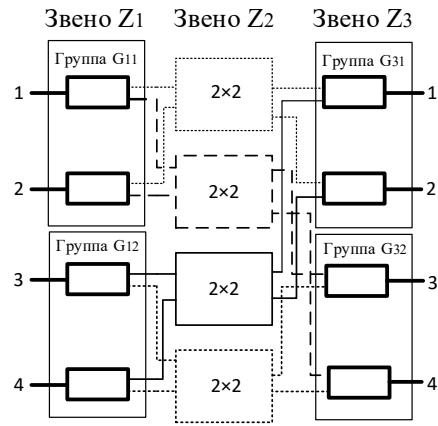


Рис. 2. Схема Шпанке 4×4 (выполнено авторами).

2. Производится нумерация блоков D_m звена $Z2$ от 1 до 4.

3. Производится нумерация групп БК G_{ij} в первом ($G11$ и $G12$) и третьем ($G31$ и $G32$) звеньях.

4. Схема соединения выходов БК звена $Z1$ со входами блоков звена $Z2$ следующая. Выходы первого БК в группе $G11$ подключаются к первым входам блоков $D1$ и $D2$. Выходы второго БК группы $G11$ подключаются ко вторым входам блоков $D1$ и $D2$. Выходы первого БК группы $G12$ подключаются к первым входам блоков $D3$ и $D4$. Выходы второго БК группы $G12$ подключаются ко вторым входам блоков $D3$ и $D4$.

5. Схема соединения БК звена $Z3$ с выходами блоков звена $Z2$ следующая. Входы первого БК группы $G31$ подключаются к первым выходам блоков $D1$ и $D3$. Входы второго БК группы $G31$ подключаются ко вторым выходам блоков $D1$ и $D3$. Входы первого БК группы $G32$ подключаются к первым выходам блоков $D2$ и $D4$. Входы второго БК группы $G32$ подключаются ко вторым выходам блоков $D2$ и $D4$.

Используя разработанный выше алгоритм анализа и синтеза коммутационных схем Шпанке, составлена приведённая на рис. 3 схема коммутатора ёмкостью 8×8 .

Авторами предложена следующая методика расчёта вероятностей возникновения внутренних блокировок для коммутационных схем Шпанке.

Рассмотрим пример передачи трафика через схему коммутации Шпанке ёмкостью 2×2 (рис. 1) с первого входа к первому выходу.



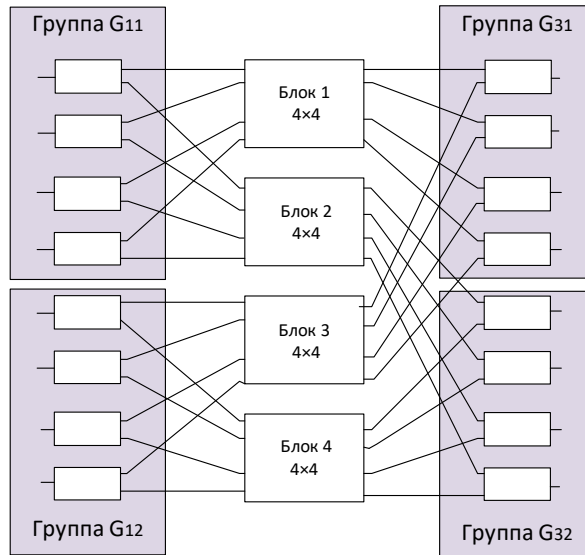


Рис. 3. Пример синтезированной схемы Шпанке 8×8 (выполнено авторами).

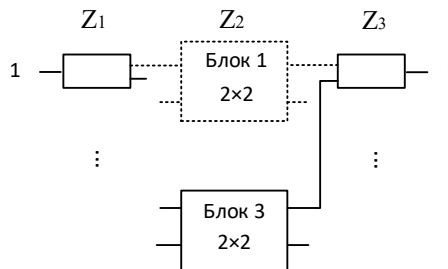


Рис. 4. Фрагмент структуры Шпанке 4×4 (выполнено авторами).

Введём следующие дополнительные обозначения:

- $q_{\text{шм}}$ – вероятности возникновения внутренних блокировок в схеме Шпанке ёмкостью M ;
- ρ – средняя интенсивность поступающей удельной нагрузки на каждый из входов ФК, Эрл;
- α – коэффициент тяготения поступающей нагрузки в схеме ФК.

Рассмотрим процедуру обслуживания нагрузки в схеме данного коммутатора. Внутренние блокировки возникнут в случае, когда на входы, например, первого БК звена $Z2$ поступит наблюдаемая обслуживаемая нагрузка и конкурирующая нагрузка со второго входа ФК. В этом случае вероятности возникновения блокировки соединения между первым входом и первым выходом определяются по формуле:

$$q_{\text{ш2}} = 1 - (1 - \alpha \cdot \rho) = \alpha \cdot \rho. \quad (1)$$

Аналогичным образом определим вероятности возникновения внутренних блокировок для схемы Шпанке 4×4 $q_{\text{ш4}}$, представив каждый блок в звене $Z2$ схемой Шпанке 2×2 (рис. 2).

Преобразуем схему рис. 2 в упрощённую, приведённую на рис. 4. В общей схеме выделим пути установления соединения первого входа с первым выходом.

На выходе 1 звена $Z3$ вероятности возникновения блокировок передаваемого трафика будут зависеть от величины нагрузки, поступающей с выхода третьего блока 2×2.

На основании вышесказанного выразим вероятности появления внутренних блокировок в схеме Шпанке 4×4 $q_{\text{ш4}}$ через вероятности возникновения внутренних блокировок $q_{\text{ш2}}$:

$$q_{\text{ш4}} = 1 - (1 - q_{\text{ш2}}) \cdot (\alpha \cdot \rho)^3 \cdot (1 - \alpha)^2. \quad (2)$$

В классических схемах Шпанке [14–16] обслуживаемая нагрузка концентрируется в БК 2×1 звена $Z3$. Это приводит к появлению

Таблица 1

Вероятности возникновения внутренних блокировок в модернизированных схемах Шпанке различной ёмкости при интенсивности поступающей нагрузки $\rho = 0,001$ Эрл

α	$q_{Ш2}$	$q_{Ш4}$	$q_{Ш8}$	$q_{Ш16}$	$q_{Ш32}$	$q_{Ш64}$	$q_{Ш128}$
0,1	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,199 \cdot 10^{-3}$	$0,299 \cdot 10^{-3}$	$0,399 \cdot 10^{-3}$	$0,499 \cdot 10^{-3}$	$0,599 \cdot 10^{-3}$	$0,699 \cdot 10^{-3}$
0,5	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,999 \cdot 10^{-3}$	$1,499 \cdot 10^{-3}$	$1,998 \cdot 10^{-3}$	$2,497 \cdot 10^{-3}$	$2,996 \cdot 10^{-3}$	$3,494 \cdot 10^{-3}$
0,9	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$1,799 \cdot 10^{-3}$	$2,697 \cdot 10^{-3}$	$3,595 \cdot 10^{-3}$	$4,491 \cdot 10^{-3}$	$5,387 \cdot 10^{-3}$	$6,283 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

Вероятности возникновения внутренних блокировок в модернизированных схемах Шпанке различной ёмкости при интенсивности поступающей нагрузки $\rho = 0,01$ Эрл

α	$q_{Ш2}$	$q_{Ш4}$	$q_{Ш8}$	$q_{Ш16}$	$q_{Ш32}$	$q_{Ш64}$	$q_{Ш128}$
0,1	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,999 \cdot 10^{-3}$	$2,997 \cdot 10^{-3}$	$3,994 \cdot 10^{-3}$	$4,990 \cdot 10^{-3}$	$5,985 \cdot 10^{-3}$	$6,979 \cdot 10^{-3}$
0,5	$5 \cdot 10^{-3}$	$9,975 \cdot 10^{-3}$	$14,925 \cdot 10^{-3}$	$19,850 \cdot 10^{-3}$	$24,751 \cdot 10^{-3}$	$29,627 \cdot 10^{-3}$	$34,479 \cdot 10^{-3}$
0,9	$9 \cdot 10^{-3}$	$17,919 \cdot 10^{-3}$	$26,757 \cdot 10^{-3}$	$35,516 \cdot 10^{-3}$	$44,197 \cdot 10^{-3}$	$52,799 \cdot 10^{-3}$	$61,324 \cdot 10^{-3}$

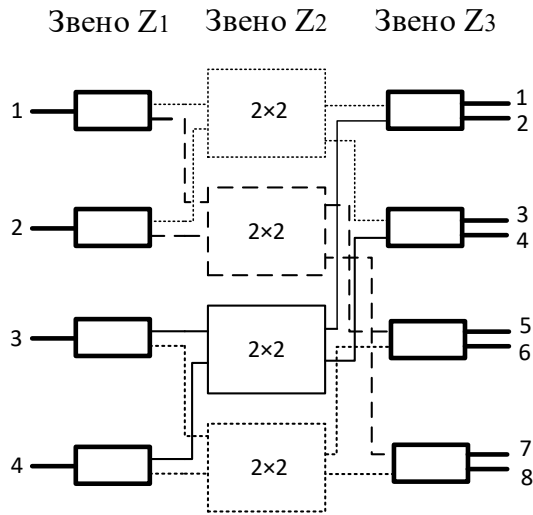


Рис. 5. Модернизированная схема Шпанке 4×4 (выполнено авторами).

значительных вероятностей блокировок трафика.

В качестве примера при $\rho = 0,001$ Эрл, $\alpha = 0,5$ вероятности возникновения блокировок в схеме Шпанке 4×4 составят $q_{Ш4} = 0,999$.

Авторами предлагается модернизировать классическую схему Шпанке путём замены в звене Z3 БК 2×1 на БК 2×2. Данная схема представлена на рис. 5.

В этом случае вероятности возникновения внутренних блокировок в модернизированной схеме Шпанке 4×4:

$$q_{Ш4} = 1 - (1 - \alpha \cdot \rho) \cdot (1 - q_{Ш2}). \quad (3)$$

Для произвольного значения ёмкости M формула вероятностей возникновения внутренних блокировок примет вид:

$$q_{ШM} = 1 - (1 - \alpha \cdot \rho) \cdot (1 - q_{Ш\frac{M}{2}}). \quad (4)$$

Результаты расчётов вероятностей возникновения внутренних блокировок в схемах Шпанке с БК 2×2 в звене Z3 представлены в табл. 1 и табл. 2.

ВЫВОДЫ

Предложенная авторами замена в схемах Шпанке выходных БК 2×1 на БК 2×2 позволяет уменьшить вероятности возникновения внутренних блокировок в среднем на три порядка, что даст возможность обеспечить высокую пропускную способность и применять их в оптических сетях ИЦТС с фотонной коммутацией.

Разработанный метод позволяет анализировать и синтезировать схемы ФК на примере схемы Шпанке любой ёмкости и определять вероятности возникновения





внутренних блокировок. Предложен блочный принцип синтеза схем, основанный на результатах анализа и синтеза схем Шпанке меньшей ёмкости.

Величины удельных нагрузок ρ и коэффициенты тяготения нагрузок α влияют на значения вероятностей возникновения внутренних блокировок, прежде всего с увеличением ёмкости ФК.

Вероятности возникновения блокировок в ФК малой ёмкости $M/2$ увеличиваются примерно в три раза в схемах ёмкостью M .

С увеличением коэффициента тяготения нагрузки вероятности блокировок могут увеличиваться до девяти раз, независимо от ёмкости ФК.

В ходе дальнейших исследований предполагается рассмотрение результатов математического моделирования для остальных классических схем ФК.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Agrawal, G. P. Nonlinear Fiber Optics. 3rd ed. Eds.: Kelley, P. L., Kaminow, I. P., Agrawal, G. P. Boston, Academic Press, 2000, 468 p. [Электронный ресурс]: http://read.pudn.com/downloads143/ebook/620953/Nonlinear_Fiber_Optics_3E.pdf. Доступ 09.01.2021. DOI: 10.1007/3-540-46629-0_9.
2. Liu, Ai-qun; Zhang, Xuming; Lu, Cheng; Wang, F.; Liu, Zishun. Optical and mechanical models for a variable optical attenuator using a micromirror drawbridge. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, Vol. 13 (3), pp. 400–411. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/228697763_Optical_and_mechanical_models_for_a_variable_optical_attenuator_using_a_micromirror_drawbridge. Доступ 09.01.2021.
3. Säckinger, E. Broadband Circuits for Optical Fiber Communication. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005, 453 p. [Электронный ресурс]: <https://b-ok.global/book/490967/864d86>. Доступ 09.01.2021.
4. Grade, J. D., Jerman, H., Kenny, T. W. Design of Large Deflection Electrostatic Actuators. Journal of Microelectromechanical Systems, 2003, Vol. 12, Iss. 3, pp. 335–343. DOI: 10.1109/JMEMS.2003.811750.
5. Bryzek, J., Abbott, E., Flannery, A., Cagle, D., Maitan, J. Control Issues for MEMS. 42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No. 03CH37475), Maui, Hawaii, Dec, 2003. DOI: 10.1109/CDC.2003.1273090.
6. Hiroyuki, Fujita; Hiroshi, Toshiyoshi. Electrostatic Micro Torsion Mirrors for an Optical Switch Matrix. Journal

of Microelectromechanical Systems, 1996, Vol. 5, No. 4, pp. 231–237. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Hiroyuki_Fujita/publication/3329122_Electrostatic_micro_torsion_mirrors_for_an_optical_switch_matrix/links/0deec52b39513cd648000000/Electrostatic-micro-torsion-mirrors-for-an-optical-switch-matrix.pdf. Доступ 09.01.2021.

7. Kurzweg, T. P., Morris III, A. S. Macro-Modeling of Systems Including Free-Space Optical MEMS. 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems – MSM 2000, Tech. Proc. San Diego, California, USA, March 27–29, pp. 146–149. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/2635436_Macro-Modeling_of_Systems_Including_Free-Space_Optical_MEMS. Доступ 09.01.2021.

8. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 323 с. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/agraval-gp-nelineynaya-volokonnaya-optika_56ae28bf45d.html. Доступ 09.01.2021.

9. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 267 с. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/26025483-R-r-ubaydullaev-volokonno-opticheskie-seti.html>. Доступ 09.01.2021.

10. Фокин В. Г. Когерентные оптические сети: Учебное пособие / Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; кафедра многоканальной электросвязи и оптических систем. – Новосибирск, 2015. – 372 с. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/61495673-Kogerentnye-opticheskie-seti.html>. Доступ 09.01.2021.

11. Дмитриев С. А., Слепов Н. Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы. – 2-е изд. – М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. – 576 с. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/dmitriev-s-a-slepov-n-n-volokonno-opticheskaya-tehnika-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy_c0ecd82d2ee.html. Доступ 09.01.2021.

12. Скларов О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 272 с. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/sklyarov-ok-volokonno-opticheskie-seti-i-sistemy-svyazi-uchebnoe-posobie_45ecba93b72.html. Доступ 09.01.2021.

13. Руденко Д. В. Структурные характеристики оптических коммутаторов // Мир транспорта. – 2012. – № 4. – С. 125–129. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/714/1063>. Доступ 09.01.2021.

14. Барабанова Е. А. Оптическая двухкаскадная коммутационная система для обработки больших объёмов данных // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 7–18. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-7-18.

15. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005. – 208 с. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/listvin-av-listvin-vn-reflektometriya-opticheskikh-volokon_505adaab51a.html. Доступ 09.01.2021.

16. Zhou, Ting; Jia, Hao. Method to optimize optical switch topology for photonic network-on-chip. Optics Communications, 2018, Vol. 413, pp. 230–235. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.12.062. ●

Информация об авторах:

Казанский Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент Российского университета транспорта, Москва, Россия, nkazan@inbox.ru.

Лысюк Полина Игоревна – преподаватель специальных дисциплин Колледжа связи № 54 имени П. М. Вострухина, Москва, Россия, polina-lpi@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 27.07.2019, актуализирована 18.09.2020, 19.01.2021, одобрена после рецензирования 06.09.2021, принята к публикации 17.09.2021.