

Электродинамика, антенны и техника СВЧ

DOI 10.66032/2221-2574-2026-1-2-53-57

УДК 621.372

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ТРАНСИВЕРАМИ В ГИБКИХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Поповский Никита Игоревич

аспирант кафедры оптических и квантовых систем связи, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича».

Адрес: 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1.

E-mail для связи: [nikitanikita24@mail.ru](mailto:nikitnikita24@mail.ru)

Аннотация: В статье рассматривается метод управления гибкими оптическими сетями, ориентированный на требования транспортной инфраструктуры 6G и реализующий программное управление параметрами физического уровня на базе оптических адаптивных трансиверов. Предложена математическая модель адаптивного оптического трансивера как управляемого объекта с конфигурационными параметрами (центральная частота, полоса пропускания, число поднесущих, формат модуляции) и параметрами состояния, используемыми в замкнутом контуре управления сетью. Разработана методика эмуляции трафика для пяти потоков и продемонстрирована способность T-SDN-контроллера к динамической адаптации параметров физического уровня в условиях меняющейся нагрузки.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы передачи, гибкие оптические сети, интеллектуальные системы управления, программно-конфигурируемые сети, адаптивные оптические трансиверы.

Введение

Появление большого количества трафика в транспортных оптических сетях, обусловленного развитием облачных вычислений, центров обработки данных, IoT и внедрением стандартов связи 5G/6G, приводит к необходимости оперативного масштабирования ёмкости магистральных и агрегационных сегментов транспортных сетей, а также к ужесточению требований к управляемости физическим уровнем [1]. В таких условиях статическая конфигурация DWDM-каналов приводит к неэффективному использованию спектральных ресурсов и росту эксплуатационных затрат [2].

Современный трафик характеризуется высокой динамичностью: короткие пики нагрузки, резкие изменения направления потоков, требования к QoS/QoT для разных классов сервисов [3]. В этих условиях традиционные подходы управления волоконно-оптическими сетями передачи, основанные на статическом планировании и фиксированных профилях передачи, приводят к неэффективному использованию спектральных ресурсов.

Классические сети DWDM с фиксированной частотной сеткой формально упрощают эксплуатацию, однако ограничивают гибкость: канал задаётся как заранее выделенный набор спектральных слотов, зачастую с запасом “на худший случай”. В результате при благоприятном состоянии канала связи сеть продолжает использовать низкоэффективный формат модуляции и лишнюю спектральную полосу, даже если QoT (Quality of Transmission) допускает увеличение пропускной способности используя меньше ресурсов [4].

Гибкие оптические сети предоставляют механизм дискретизации спектра с тонкой гранулярностью, однако полный эффект достигается лишь при наличии адаптивных трансиверов, способных ди-

намически изменять полосу пропускания и формат модуляции сигнала, а также при наличии системы управления, учитывающей текущие параметры качества передачи сигналов.

Целью работы является исследование математической модели адаптивного оптического трансивера как объекта управления и разработка методики эмуляции трафика для демонстрации управления соединениями с помощью T-SDN-контроллера. Для достижения поставленной цели сформулирована постановка алгоритма оптимизации маршрутизации и разработан критерий оптимальности, учитывающий спектральный расход, фрагментацию, стоимость реконфигураций и риски блокировок. Проведена эмуляция для пяти потоков и получены зависимости $R_{req}(t)$, $N(t)$, $M(t)$ и показатели реконфигураций/блокировок.

Математическая модель адаптивного оптического трансивера

Архитектура управления гибкими оптическими сетями строится на принципе разделения плоскостей данных и управления и включает следующие функциональные элементы: T-SDN-контроллер, принимающий решения о распределении маршрутов, спектральных ресурсов и параметрах передачи сигнала, и адаптивные оптические трансиверы, транслирующие высокоуровневые команды T-SDN-контроллера в низкоуровневые операции физического уровня [5].

С математической точки зрения адаптивный оптический трансивер рассматривается как объект с множеством допустимых режимов передачи сигнала:

$$x = (M, N, \Delta f, FEC),$$

где $M \in \{QPSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM\}$ — формат модуляции сигнала; N — число активных поднесущих (для OFDM-реализации) либо эквивалентная

ширина спектрального блока; Δf — шаг поднесущих (или ширина слота Flex-Grid); FEC — метод коррекции ошибок. Для практического управления достаточно параметризовать значения M и N при фиксированных Δf и FEC, что соответствует наиболее распространённым сценариям эксплуатации волоконно-оптических систем связи [7].

Использование OFDM при реализации трансиверов позволяет формировать суперканалы с варьируемой полосой пропускания за счёт изменения числа активных поднесущих [6]. При шаге поднесущих Δf и числе активных поднесущих N эффективная полоса определяется как $B \approx k \cdot N \cdot \Delta f$ с учётом защитных интервалов и циклического префикса.

Пропускная способность адаптивного оптического трансивера при выбранном режиме передачи оценивается как

$$R(M, N) = N \cdot R_0 \cdot b(M) \cdot (1 - P_{FEC}),$$

где N — число активных поднесущих; R_0 — скорость передачи на поднесущей при использовании формата модуляции QPSK; $b(M)$ — число бит на символ при выбранном формате модуляции ($b(QPSK)=2$, $b(16QAM)=4$, $b(32QAM)=5$, $b(64QAM)=6$ соответственно); ρ_{FEC} — доля избыточности кодирования. При эмуляции используется нормированная модель с фиксированным R_0 и заданным ρ_{FEC} .

Для согласования модели с Flex-Grid сеткой частот вводится связь спектрального блока со слотами $S = B / \Delta f_{slot}$, где S — число занятых слотов на каждом ребре маршрута.

Качество передачи характеризуется метриками QoT измеряемыми трансивером или встроенным анализатором: OSNR и оценкой BER (или Q-factor). Используется пороговая модель допустимости использования выбранного вида формата модуляции и количества поднесущих (M, N) для данного маршрута p , если:

$$OSNR(p) \geq OSNR_{thr}(M) + \Delta_{margin},$$

$$BER(p, M) \leq BER_{thr}.$$

где величина Δ_{margin} задаёт запас устойчивости и уменьшает вероятность деградации канала связи при возникновении флуктуаций. Для снижения частоты колебаний системы вводится: повышение уровня модуляции допускается при устойчивом превышении порога

$$OSNR_{up} = OSNR_{thr}(M) + \Delta_{margin} + \Delta_h$$

в течение времени T_h , а понижение — при устойчивом нарушении порога $OSNR_{down} = OSNR_{thr}(M) + \Delta_{margin}$ в течение T_h .

Эмуляция работы архитектуры управления адаптивными трансиверами

Пусть гибкая оптическая сеть описывается графом $G(V, E)$, а спектр на каждом ребре дискретизован на слоты для Flex-Grid сетки. Тогда для входного запроса $r = (s, d, R_{req})$ требуется найти решение

$$x = \langle p, [f_1, f_2], M, N \rangle,$$

где p — маршрут между узлами s и d ; $[f_1, f_2]$ — непрерывный спектральный блок; M и N — параметры режима адаптивного трансивера.

Решение должно удовлетворять ограничениям:

1. спектр $[f_1, f_2]$ непрерывен и доступен на каждом ребре пути;
2. один и тот же спектральный блок используется на всех рёбрах маршрута;
3. выбранный формат модуляции M допустим для маршрута p ;
4. $R(M, N) \geq R_{req}$

Целевая функция задаёт критерий оптимальности, по которому T-SDN-контроллер выбирает конкретное решение для каждого соединения: маршрут p , спектральный блок $[f_1, f_2]$, модуляцию M и число поднесущих N :

$$C(x) = \alpha S(x) + \beta Frag(p, S) + \gamma Reconf(x) + \delta risk(QoT),$$

где $S(x)$ — число слотов (или поднесущих), требуемое для работы режима (M, N) на маршруте p .

Фрагментация $Frag(p)$ рассчитывается по формуле:

$$Frag(p) = \max_e F_e,$$

$$F_e = 1 - \frac{\max_i |g_{e,i}|}{\sum_i |g_{e,i}| + \varepsilon},$$

где $g_{e,i}$ — свободные спектральные слоты на ребре e .

Реконфигурация определяется формулой:

$$Reconf(x) = w_r \|(p \neq \bar{p}) + w_m \|(M \neq \bar{M}) + w_n \|(N \neq \bar{N}),$$

где $\bar{p}, \bar{M}, \bar{N}$ — предыдущие состояния.

Риск QoT рассчитывается через запас по OSNR:

$$\Delta OSNR(x) = OSNR(p) - (OSNR_{thr}(M) + \Delta_{margin}),$$

$$Risk(QoT) = \max \{0, \Delta_{req} - \Delta OSNR(x)\},$$

где Δ_{req} — минимальный желаемый запас (например 0...2 дБ).

Для демонстрации работы метода используется дискретно-временная эмуляция с шагом Δt , в которой трафик задан временными рядами требований к скорости для множества соединений. На каждом шаге T-SDN-контроллер решает задачу совместного назначения маршрута, спектра и формата модуляции с учётом текущей доступности спектральных ресурсов и ограничений QoT [8].

Модель трафика задаётся функцией $R_{req}^k(t)$, где k — индекс соединения. В работе применены пульсирующие профили с периодическими пиками и случайной составляющей, отражающие особенности агрегированного трафика в транспортных сегментах сети. Для каждого соединения T-SDN-контроллер вычисляет маршруты, оценивает OSNR для маршрута p и выбирает максимально эффективный допустимый формат модуляции M . После

Таблица 1. Параметры эмуляции

Названия параметра	Значение параметра
Число потоков	5
Длительность	$T = 72$ интервала, шаг Δt (условный)
Спектральный ресурс линии	22 условных поднесущих на ребро
Набор модуляций	QPSK/8QAM/16QAM/32QAM/64QAM
Модель QoT	$OSNR(p) = OSNR_0 - k \cdot L(p) + \zeta$, $OSNR_0 = 32$ дБ, $k = 0,03$ дБ/км, $\zeta \sim N(0, 0, 9)$
Пороги OSNR	$OSNR_{thr} = \{12; 14; 16; 20; 24\}$ дБ
Запас OSNR	$\Delta_{margin} = 1,5$ дБ
Ёмкость поднесущей	$R_0 = 10$ Гбит/с (QPSK), $p_{FEG} = 0,07$
Число кандидатных маршрутов	$k = 5$

Таблица 2. Результаты эмуляции

Показатель	Статическая DWDM	Адаптивная архитектура	Изменение показателей
Средний спектральный расход, ГГц	220	185	-16%
Доля неудовлетворённого трафика, %	8	4	-50%
Средний запас $\Delta OSNR$, дБ	1,5	1,8	+20%
Число реконфигураций	0	48	—

выбора M определяется минимальное число поднесущих N , удовлетворяющее $R(M, N) \geq R_{req}^k(t)$.

Реконфигурация маршрутов выполняется поэтапно. План изменений включает резервирование спектральных блоков на всех рёбрах маршрута и настройку параметров трансиверов (M , N). При нарушении порога QoT выполняется откат и выбор альтернативного режима, например, понижение модуляции при неизменном маршруте либо смена маршрута при дефиците спектральных блоков [9].

Для оценки динамики управления фиксируются следующие показатели: число реконфигураций (изменение маршрута и/или режимов передачи сигнала), доля шагов без деградации QoT, а также временные зависимости $R_{req}^k(t)$ выделенной ёмкости и выбранных параметров (M , N).

Эмуляция предназначена для воспроизводимой демонстрации способности T-SDN-контроллера поддерживать переменный трафик и выполнять реконфигурации в реальном времени. На временных интервалах t_i для пяти потоков задаются требования по скорости $R_{req}^k(t)$ как пульсирующие временные ряды с периодическими пиками и случайной составляющей. На каждом шаге выполняется переключение соединений с учётом конкуренции за спектральные ресурсы сети. При дефиците спектральных ресурсов на предпочтительном маршруте допускается переназначение маршрута [10].

Эмуляция проведена на малой топологии с двумя параллельными маршрутами

между узлами, что позволяет воспроизвести конкуренцию за спектральные ресурсы и необходимость переназначения маршрута. Качество передачи описано простой моделью OSNR, убывающей с длиной маршрута и содержащей случайную компоненту, что моделирует флуктуации физической среды. В ходе эксперимента T-SDN-контроллер выполнял выбор формата модуляции и числа активных поднесущих для удовлетворения текущего спроса по скорости передачи сигналов.

Для количественного сравнения работы архитектуры управления адаптивными трансиверами со статической DWDM системой введён базовый сценарий, в котором для каждого соединения фиксируются маршрут, спектральный ресурс и формат модуляции, выбранные по худшему QoT и максимальному требованию трафика на интервале наблюдения. Для предложенного подхода выполняется динамическое назначение (p , B , M , N) при контроле

QoT. Оценка проводится методом двух прогонов на одинаковых временных рядах трафика с расчётом метрик спектрального расхода, вероятности блокировки, доли удовлетворения спроса, запаса по QoT и числу реконфигураций. Полученные результаты (таблица 2) демонстрируют снижение среднего спектрального расхода и блокировок при сохранении QoT ценой увеличения числа реконфигураций.

Алгоритм сравнительной оценки работы двух разных систем:

1. Задаётся топология сети $G(V, E)$, параметры волокон (OSNR-модель), спектральная сетка и профиль трафика $D_k(t)$;
2. Выполняется моделирование статического DWDM режима на интервале $t = 1 \dots T$ с вычислением:
 - занимаемой полосы $S_k(t)$
 - доступной ёмкости $C_k(t)$
 - запаса по QoT $OSNRR_k(t)$

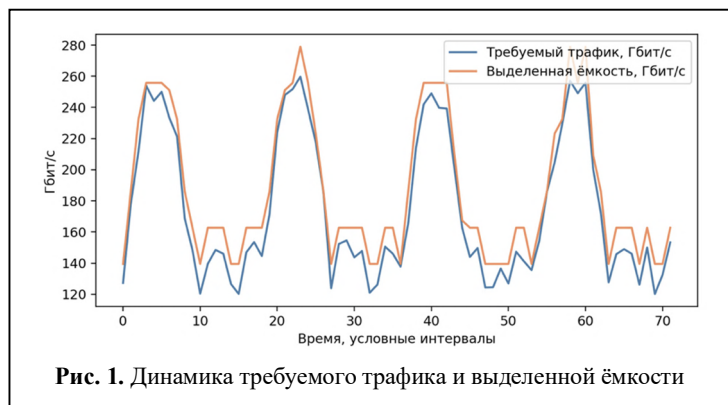


Рис. 1. Динамика требуемого трафика и выделенной ёмкости

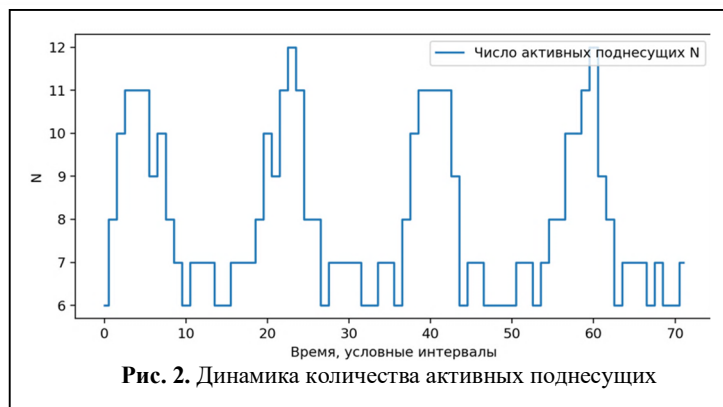


Рис. 2. Динамика количества активных поднесущих

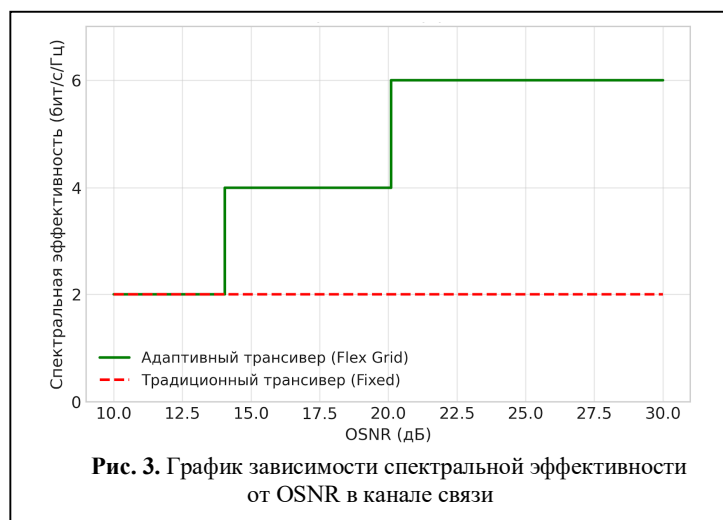


Рис. 3. График зависимости спектральной эффективности от OSNR в канале связи

3. Выполняется моделирование режима работы архитектуры управления адаптивными трансиверами на том же наборе потоков и временных интервалов.

4. Для обоих режимов рассчитываются интегральные показатели:

- средний спектральный расход;
- доля неудовлетворенного трафика;
- средний запас по QoT;
- число реконфигураций.

5. Выигрыш от использования адаптивной архитектуры определяется как относительное изменение соответствующих метрик.

На рис. 1 представлена динамика трафика и выделенной ёмкости для одного из соединений. При росте требований T-SDN-контроллер увеличивает число активных поднесущих, а при достаточном OSNR и BER повышает порядок модуляции, тем самым ограничивая рост занимаемой спектральной полосы.

За время наблюдения число реконфигураций для всех соединений составило 54. Дополнительно оценена доля блокировок и средний спектральный расход (среднее число слотов/поднесущих на соединение). Полученные показатели демонстрируют компромисс между снижением расхода спектральных ресурсов и ростом числа реконфигураций при повышении порядка модуляции. Отмеченные изменения включают переключения уровней модуля-

ции, изменение числа поднесущих и, при дефиците спектральных блоков на одном из маршрутов, переназначение пути. Данные показатели используются для анализа компромисса между спектральной эффективностью и стабильностью доступности канала передачи.

Таким образом, T-SDN-контроллер реализует три согласованных механизма адаптации: масштабирование полосы пропускания через изменение числа активных поднесущих, повышение спектральной эффективности через выбор формата модуляции сигнала и переназначение маршрута при дефиците спектральных ресурсов. Совокупность этих механизмов соответствует требованиям к транспортной инфраструктуре 6G в части управляемости и масштабируемости ёмкости каналов передачи при сохранении заданного уровня QoT [11, 12].

Заключение

В данной статье был исследован метод управления гибкими оптическими сетями для транспортной инфраструктуры 6G на базе адаптивных оптических трансиверов, в котором управление физическим уровнем обеспечивается программной абстракцией трансивера и замкнутым контуром управления. Предложена формализованная математическая модель адаптивного оптического трансивера, связывающая требования к скорости с параметрами передачи (формат модуляции, число поднесущих) и ограничениями QoT. Введён критерий оптимальности, объединяющий расход спектральных ресурсов, фрагментацию спектра и стоимость реконфигураций маршрутов. Разработана методика эмуляции метода управления гибкими оптическими сетями, демонстрирующая, что T-SDN-контроллер способен в реальном времени перенастраивать адаптивные оптические трансиверы и переназначать маршруты при ограниченных спектральных ресурсах. Полученные результаты создают основу для дальнейшей верификации на расширенных сетевых топологиях и для включения дополнительных факторов QoT (нелинейности, дисперсия, затухания) в модель принятия решения.

Литература

1. Былина М.С., Глаголев С.Ф. Оптоэлектронные технологии в инфокоммуникациях: современное состояние и перспективы // Первая миля. 2024. № 7 (123). С. 52–59.
2. Коган С.С., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Высоко-скоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM // Прикладная фотоника. 2024. Т. 11, № 1. С. 84–98.
3. Кучерявый А.Е., Окунева Д.В., Парамонов А.И., Хоанг Н.Ф. Методы распределения трафика в гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10, № 2. С. 67–74.

4. Поповский Н.И., Давыдов В.В. Гибкие оптические сети и способы реализации оптических суперканалов // Электросвязь. 2024. № 8. С. 44–47.
5. Поповский Н.И., Давыдов В.В. Разработка трансверса оптического сигнала OFDM на основе AWGR // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2024. № 3. С. 2431108.
6. Фокин В.Г., Ибрагимов Р.З. Гибкие оптические сети: учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 252 с.
7. Чебыкин И.П., Старых Д.Д., Наний О.Е., Андреев Г.А., Трещиков В.Н. Сравнение скорости и точности алгоритмов оптимизации волоконно-оптических линий связи // Журнал технической физики. 2024. Т. 94. № 11. С. 1848–1853.
8. Castoldi P. Control of Optical Networks: a Reality Check and Future Perspectives // European Conference on Optical Communication. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.17975657.
9. Ravipudi J. L., Brandt-Pearce M. Machine-learning-based impairment-aware dynamic RMSCA in multi-core elastic optical networks // Journal of Optical Communications and Networking. 2024. Vol. 16. No. 10. P. F26–F39. DOI: 10.1364/JOCN.530035.
10. Li S. OpticGAI: Generative AI-aided Deep Reinforcement Learning for Optical Networks Optimization // ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Optical Technologies. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2406.15906.
11. ITU-T Recommendation G.694.1 (10/2020). Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid [Электронный ресурс]: сайт организации International Telecommunication Union, 2020. URL: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=14498> (дата обращения 18.01.2026).
12. ITU-T Recommendation G.798 (01/2021). Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks. [Электронный ресурс]: сайт организации International Telecommunication Union, 2021. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.798> (дата обращения 18.01.2026).

Поступила 19 января 2026 г.

English

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CONTROL METHODS FOR ADAPTIVE OPTICAL TRANSCEIVERS IN FLEXIBLE OPTICAL NETWORKS

Nikita Igorevich Popovskiy — Postgraduate Student, Department of Optical and Quantum Communication Systems, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

Address: 193232, Russian Federation, Saint Petersburg, Bolshhevikov ave., 22/1.

E-mail: nikitanikita24@mail.ru

Abstract: This article examines a method for managing flexible optical networks, tailored to the requirements of 6G transport infrastructure and implementing software-based control of physical layer parameters using adaptive optical transceivers. A mathematical model of an adaptive optical transceiver as a controlled object with configuration parameters (center frequency, bandwidth, number of subcarriers, modulation format) and state parameters used in a closed-loop network control loop is proposed. A traffic emulation technique for five flows is developed, and it is demonstrated how a T-SDN controller reconfigures transceivers in real time (enabling/disabling subcarriers, switching modulation formats) and performs route reassignment during competition for spectral resources.

Keywords: fiber-optic transmission systems, flexible optical networks, intelligent control systems, software-defined networks, adaptive optical transceivers.

References

1. Bylina M.S., Glagolev S.F. Optoelectronic Technologies in Infocommunications: Current Status and Prospects. *Pervaya Milya*. 2024. No. 7 (123). Pp. 52–59.
2. Kogan S.S., Naniy O.E., Treshchikov V.N. High-Speed Optical Cables for Promising OTN/DWDM Fiber-Optic Networks. *Applied Photonics*. 2024. Vol. 11, No. 1. Pp. 84–98.
3. Kucheryavy A.E., Okuneva D.V., Paramonov A.I., Hoang N.F. Traffic Distribution Methods in a High-Density Heterogeneous Internet of Things Network. *Proceedings of Communications Educational Institutions*. 2024. Vol. 10. No. 2. Pp. 67–74.
4. Popovsky N.I., Davydov V.V. Flexible Optical Networks and Implementation Options for Optical Superchannels. *Elektrosvyaz*. 2024. No. 8. pp. 44–47.
5. Popovsky N.I., Davydov V.V. Development of an OFDM Optical Signal Transceiver Based on AWGR. *Scientific Notes of the Physics Faculty of Moscow University*. 2024. No. 3. Pp. 2431108.
6. Fokin V.G., Ibragimov R.Z. Flexible Optical Networks: A Textbook for Universities. St. Petersburg: Lan, 2022. 252 p.
7. Chebykin I.P., Starykh D.D., Naniy O.E., Andreev G.A., Treshchikov V.N. Comparison of the Speed and Accuracy of Fiber-Optic Communication Line Optimization Algorithms. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2024. Vol. 94, No. 11. Pp. 1848–1853.
8. Castoldi P. Control of Optical Networks: a Reality Check and Future Perspectives // European Conference on Optical Communication. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.17975657.
9. Ravipudi J. L., Brandt-Pearce M. Machine-learning-based impairment-aware dynamic RMSCA in multi-core elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2024. Vol. 16, no. 10. P. F26–F39. DOI: 10.1364/JOCN.530035.
10. Li S. OpticGAI: Generative AI-aided Deep Reinforcement Learning for Optical Networks Optimization. *ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Optical Technologies*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2406.15906.
11. ITU-T Recommendation G.694.1 (10/2020). Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. International Telecommunication Union, 2020. URL: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=14498> (Access Date 18.01.2026).
12. ITU-T Recommendation G.798 (01/2021). Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks. International Telecommunication Union, 2021. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.798> (Access Date 18.01.2026).