

ВЛИЯНИЕ АРХИТЕКТУРЫ УЗЛОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

Рузимов Отахон Орифжон угли,

Яронова Наталья Валерьевна

Ташкентский государственный транспортный университет

(Ташкент, Узбекистан)

Аннотация: в статье рассматриваются архитектурные модели оптических транспортных сетей, включающие линейные элементы (волоконно-оптические участки, inline-усилители, компенсаторы дисперсии и динамические эквалайзеры) и узловые структуры различных типов: непрозрачные (opaque), прозрачные (transparent) и полупрозрачные (translucent). Проведён сравнительный анализ данных архитектур с точки зрения капитальных (CAPEX) и эксплуатационных (OPEX) затрат, а также их влияния на надёжность, масштабируемость и энергоэффективность сетей. Показано, что выбор узловой архитектуры определяет не только технические характеристики, но и экономическую эффективность магистральных систем. Особое внимание уделено гибридным решениям на основе translucent-архитектуры, которые позволяют сочетать достоинства непрозрачных и прозрачных моделей, обеспечивая баланс между качеством передачи и снижением затрат. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанных моделей при проектировании и модернизации телекоммуникационных сетей в условиях роста трафика и цифровизации инфраструктуры.

Ключевые слова: оптическая транспортная сеть; линк; непрозрачная архитектура (opaque); прозрачная архитектура (transparent); полупрозрачная архитектура (translucent); inline-усилитель; компенсатор дисперсии; ОЕО-конверсия; WDM; CAPEX; OPEX.

IMPACT OF NODE ARCHITECTURE ON THE RESILIENCE AND EFFICIENCY OF OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

O.O. Ruzimov, N.V. Yaronova,

Tashkent State Transport University (Tashkent, Uzbekistan)

Abstract: this paper examines architectural models of optical transport networks, including linear elements (fiber spans, inline amplifiers, dispersion compensating fibers, and dynamic gain equalizers) and node structures of various types: opaque, transparent, and translucent. A comparative analysis of these architectures is provided in terms of capital expenditures (CAPEX) and operational expenditures (OPEX), as well as their impact on network reliability, scalability, and energy efficiency. It is shown that the choice of node architecture determines not only the technical characteristics but also the economic efficiency of backbone systems. Special attention is given to hybrid solutions based on translucent architecture, which combine the advantages of opaque and transparent models, ensuring a balance between transmission quality and cost reduction. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the developed models in the design and modernization of telecommunication networks

under conditions of traffic growth and digital infrastructure development.

Keywords: optical transport network; link; opaque architecture; transparent architecture; translucent architecture; inline amplifier; dispersion compensating fiber; OEO conversion; WDM; CAPEX; OPEX.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие телекоммуникационной инфраструктуры невозможно без широкого внедрения оптических транспортных сетей, которые представляют собой основу глобальных информационных систем. Рост объёмов передаваемого трафика, вызванный активным развитием облачных технологий, мобильной связи нового поколения и Интернета вещей, требует от операторов связи высокой пропускной способности, надёжности и экономической эффективности. В этих условиях особое значение приобретают методы построения магистральных оптических систем, обеспечивающих долгосрочную масштабируемость и адаптивность к новым требованиям.

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность оптических сетей, является архитектура их узлов и линков. От выбранной модели зависит не только устойчивость и надёжность функционирования всей сети, но и уровень капитальных (CAPEX) и эксплуатационных (OPEX) затрат, которые напрямую влияют на рентабельность операторов. В мировой практике наибольшее распространение получили три архитектурных подхода: непрозрачная (opaque), прозрачная (transparent) и полупрозрачная (translucent) модель узлов. Каждая из них обладает рядом

преимуществ и ограничений, которые необходимо учитывать при проектировании сетей различного масштаба.

Особое внимание уделяется вопросам оптимизации затрат. В условиях постоянного роста трафика операторы вынуждены инвестировать в расширение пропускной способности и повышение надёжности сетей. Однако капитальные расходы на оборудование, а также стоимость его эксплуатации, остаются крайне высокими. Поэтому исследования, направленные на разработку математических моделей для расчёта стоимости сетевых компонентов, являются актуальными и востребованными. Такие модели позволяют проектировщикам выбирать оптимальные решения, учитывающие баланс между техническими возможностями и экономической целесообразностью.

Кроме того, технологический прогресс в области волоконно-оптической связи обеспечивает новые возможности для развития сетей. Применение мультиплексирования по длине волны (WDM), использование усилителей, компенсаторов дисперсии, динамических эквалайзеров, а также совершенствование технологий регенерации сигналов открывают перспективы построения высокоэффективных транспортных систем. На этом фоне задачей исследователей становится не только описание и анализ существующих архитектур, но и поиск гибридных решений, сочетающих преимущества различных подходов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Модель линка (канала связи). Оптическая линия связи (link) является ключевым элементом магистральных транспортных сетей. Она обеспечивает передачу информации на больших расстояниях и включает в себя ряд последовательно расположенных компонентов,

необходимых для поддержания качества сигнала. Базовая конфигурация такой линии состоит из участка оптического волокна (Fiber Span, FS) и компенсатора дисперсии (Dispersion Compensating Fiber, DCF). При значительных протяжённостях канала в схему дополнительно включаются inline-усилители (IA) и, при необходимости, динамические эквалайзеры усиления (DGE). Общая структура однонаправленной линии показана на рисунке 1.

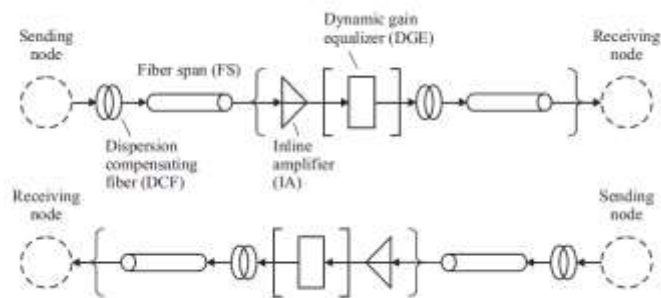


Рис. 1. Однонаправленная оптическая линия связи: FS, IA, DCF, DGE

Каждое оптическое волокно в минимальной конфигурации обеспечивает однонаправленную передачу сигнала. Для организации двусторонней связи используется пара волокон, каждое из которых работает в противоположном направлении. Такая модель проста в реализации и обеспечивает надёжность, поскольку отказ одного волокна не влияет на противоположное направление. Модель двухсторонней связи представлена на рисунке 2.

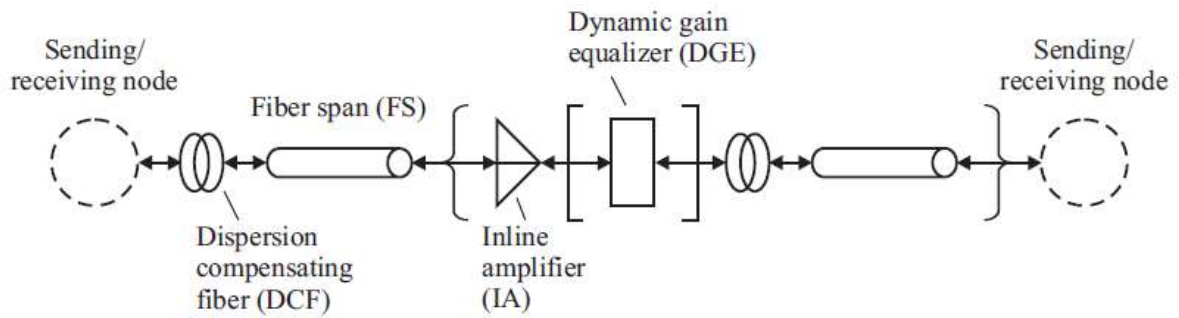


Рис. 2. Двухсторонняя модель оптической линии

При увеличении длины канала сигнал подвергается затуханию (attenuation), что требует применения inline-усилителей. Обычно усилители размещаются через равные промежутки длиной $1/2A$, что позволяет поддерживать стабильный уровень сигнала на протяжении всей линии (см. рис. 1).

Если длина канала превышает критическое значение $1/DGE$, возникает необходимость в установке динамических эквалайзеров усиления. Эти устройства компенсируют неравномерность спектральной характеристики сигнала, возникающую при многократном усилении на разных длинах волн. Таким образом, формула расчёта числа усилителей и эквалайзеров строится на делении длины линии на соответствующие критические расстояния и округлении до ближайшего целого числа вниз. Для компенсаторов дисперсии подобное округление не применяется, поскольку их использование может быть частичным.

В зависимости от используемой технологии различают несколько типов магистральных каналов: Long Haul (LH) – системы большой протяжённости; Extended Long Haul (ELH) – системы с расширенной протяжённостью; Ultra Long Haul (ULH) – системы сверхдальнего действия.

Для каждой из этих категорий задаются свои значения максимально допустимой длины передачи (IMTD). Например, переход от LH к ELH удваивает максимальную длину маршрута, а использование ULH увеличивает её в четыре раза. Такая классификация учитывается при проектировании и показана в таблицах и схемах, сопровождающих модель (см. рис. 2).

Оpaque-архитектура (непрозрачный узел). В узлах данного типа каждый входящий оптический сигнал подвергается полной конверсии в электрическую форму, где выполняются операции ретайминга, регенерации и при необходимости изменение частоты несущей. Затем сигнал преобразуется обратно в оптический вид и передаётся далее по линии. Такой процесс называется ОЕО-конверсией (Optical-Electrical-Optical).

Opaque-узлы получили широкое распространение в транспортных сетях благодаря своей универсальности и гибкости маршрутизации. Структура однонаправленного узла данного типа показана на рисунке 3.

Архитектура включает следующие компоненты: предусилитель (Pre-Amplifier, PA), усиливающий входной сигнал; оптический демультиплексор (Optical Demultiplexer, OD), разделяющий сигнал на каналы по длинам волн; транспондеры (Transponders, TP), преобразующие сигнал из «цветного» в «бесцветный» и обратно; электрическая коммутаторная матрица (Electrical Switch Fabric, ESF), выполняющая маршрутизацию сигналов между портами; оптический мультиплексор (Optical Multiplexer, OM), объединяющий выходные каналы; бустерный усилитель (Booster Amplifier, BA), компенсирующий потери мощности перед отправкой сигнала.

Преимущества: полная регенерация сигнала (3R-регенерация: reshaping, retiming, regeneration); возможность изменения несущей частоты на любом узле; отсутствие блокировок каналов, так как сигналы всегда могут быть перенаправлены.

Недостатки: высокая стоимость оборудования из-за большого числа транспондеров; повышенное энергопотребление.

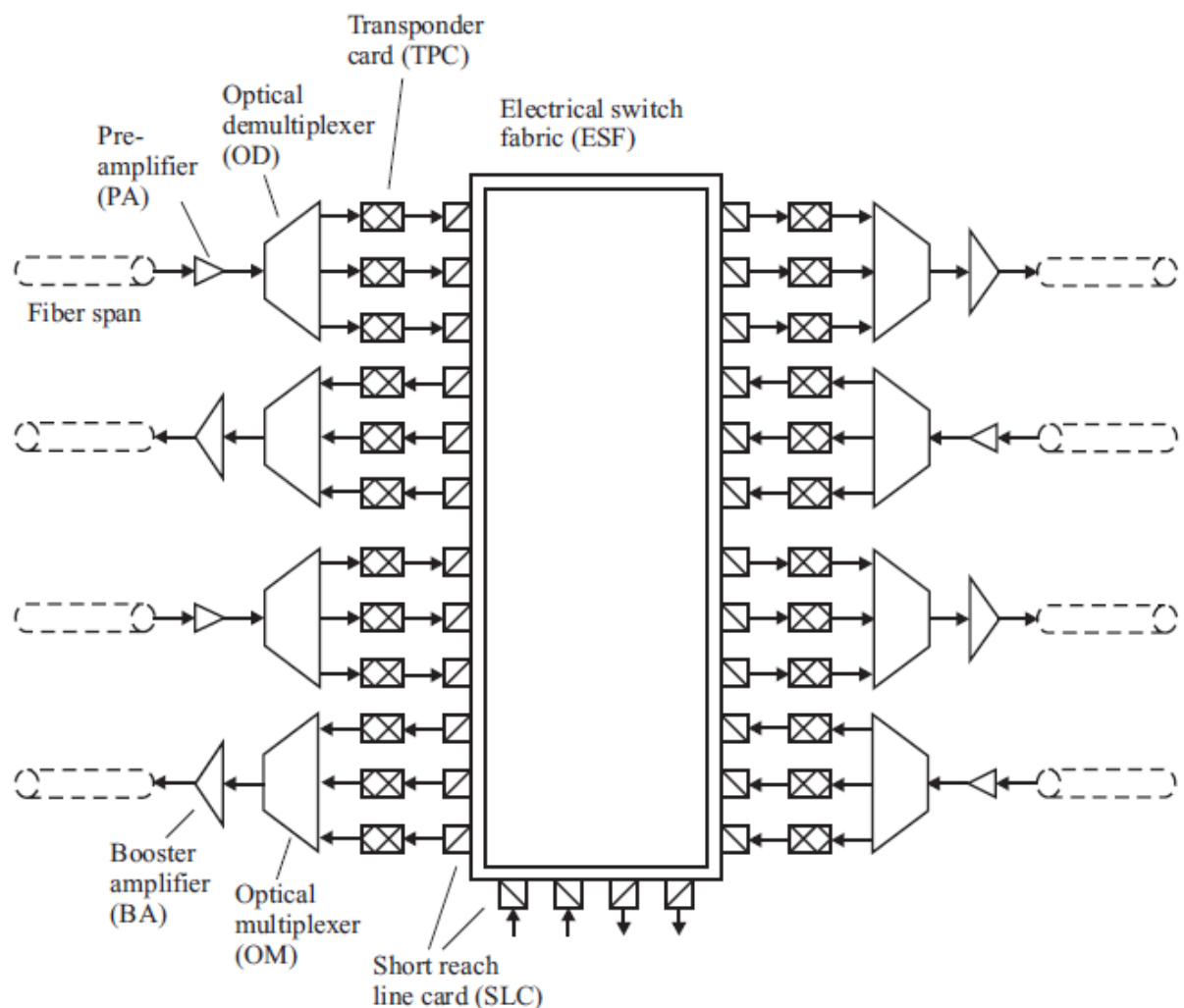


Рис. 3. Однонаправленный непрозрачный (opaque) узел

Таким образом, opaque-архитектура целесообразна в сетях, где приоритетом является надёжность и качество передачи, даже несмотря на рост капитальных и эксплуатационных затрат.

Transparent-архитектура (прозрачный узел). В прозрачных узлах обработка транзитного трафика осуществляется полностью в оптической среде, без преобразования сигналов в электрический вид. В отличие от непрозрачных узлов, где применяется полная ОЕО-конверсия, прозрачная архитектура позволяет напрямую маршрутизировать световые сигналы через оптический коммутатор. Это обеспечивает значительное снижение капитальных и эксплуатационных затрат, а также уменьшает энергопотребление оборудования. Структура однонаправленного прозрачного узла показана на рисунке 4.

Архитектура прозрачного узла включает: прозрачный предусилитель (Transparent Pre-Amplifier, TPA) для усиления всех каналов перед демультиплексированием; оптический демультиплексор (OD) для разделения WDM-сигнала на отдельные длины волн; оптический коммутатор (Optical Switch Fabric, OSF), выполняющий маршрутизацию сигналов в оптической области; оптический мультиплексор (OM) для объединения каналов перед отправкой; inline-усилители (IA) для компенсации потерь мощности на линии. Транспондеры в прозрачной архитектуре используются только для обработки локального трафика (входящих и исходящих каналов), тогда как транзитные потоки передаются напрямую через OSF.

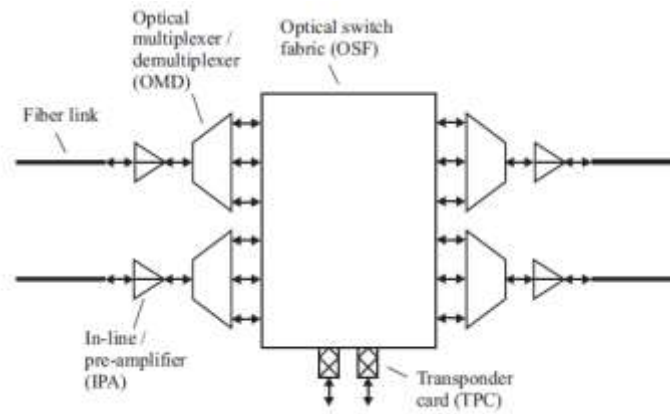


Рис. 4. Однонаправленный прозрачный (transparent) узел

Преимущества: минимальные капитальные и эксплуатационные расходы (CAPEX и OPEX); высокая энергоэффективность и низкое тепловыделение; упрощённая структура узла.

Недостатки: отсутствие регенерации сигнала, что ограничивает максимальную протяжённость маршрутов; деградация качества передачи при длинных световых путях; невозможность исправления ошибок и ретайминга на промежуточных узлах.

Таким образом, прозрачная архитектура оптимально подходит для региональных сетей и магистральных участков средней протяжённости, где требуется высокая экономичность и энергоэффективность при отсутствии необходимости в многоступенчатой регенерации.

Translucent-архитектура (полупрозрачный узел).

Полупрозрачные узлы представляют собой гибридное решение, сочетающее достоинства непрозрачных и прозрачных архитектур. Их ключевая идея заключается в том, что большая часть трафика передаётся в оптической среде, а конверсия в электрический вид осуществляется только там, где это необходимо – для регенерации

сигнала, изменения длины волны или мультиплексирования низкоскоростных потоков. Структура двухстороннего полупрозрачного узла показана на рисунке 5.

Архитектура включает следующие элементы: оптический коммутатор (Optical Switch Fabric, OSF) для маршрутизации транзитного трафика; электрический коммутатор (Electrical Switch Fabric, ESF), расположенный на локальных портах, для груминга сигналов; короткобазовые (SLC) и длиннбазовые (LLC) линейные карты, обеспечивающие соединение между низкоскоростными клиентскими сигналами и транспортными каналами; регенераторы (RG) и wavelength-конвертеры (WC), которые используются по мере необходимости для восстановления качества сигнала и изменения его несущей частоты. Полупрозрачный узел способен выполнять операции селективного добавления и удаления световых путей (lightpaths). Кроме того, архитектура позволяет при необходимости восстанавливать сигнал в электрической области, что особенно важно для длинных маршрутов, где деградация качества достигает критических значений.

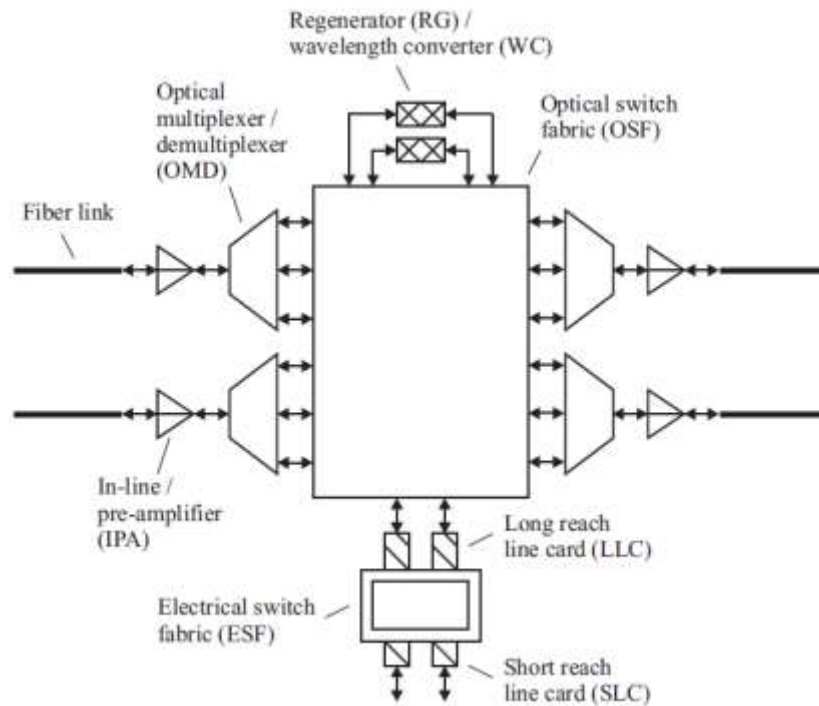


Рис. 5. Двухсторонний полупрозрачный (translucent) узел

Преимущества: оптимальное сочетание надёжности и экономичности; возможность выборочной регенерации и конверсии сигналов; гибкость при маршрутизации трафика; снижение риска деградации сигнала по сравнению с прозрачной архитектурой.

Недостатки: более высокая стоимость по сравнению с прозрачными узлами; усложнённая структура, требующая продуманного управления ресурсами.

Таким образом, translucent-архитектура является компромиссным решением, которое обеспечивает баланс между технической надёжностью непрозрачных сетей и экономичностью прозрачных. Она наиболее эффективна в магистральных сетях большого масштаба, где требуется высокая пропускная способность, гибкость и устойчивость к отказам.

Заключение

В проведённом исследовании были рассмотрены ключевые модели оптических транспортных сетей, включающие как линейные элементы, так и узловые архитектуры.

Модель линка показала, что структура оптической линии связи определяется сочетанием волоконных участков, компенсаторов дисперсии, inline-усилителей и динамических эквалайзеров. Правильный выбор параметров (LN, ELN, ULN) позволяет оптимизировать капитальные затраты за счёт рационального размещения оборудования.

Opaque-архитектура обеспечивает полную регенерацию сигнала и высокую гибкость маршрутизации. Она устраняет проблему блокировки каналов и позволяет изменять длину волны на любом узле, однако сопровождается значительными CAPEX и OPEX из-за необходимости ОЕО-конверсии на каждом участке.

Transparent-архитектура (отличается минимальными затратами и высокой энергоэффективностью, поскольку транзитный трафик обрабатывается полностью в оптической среде. Вместе с тем отсутствие регенерации ограничивает её применение в сверхдальних магистралях.

Translucent-архитектура является компромиссным решением, объединяющим достоинства двух предыдущих подходов. Она позволяет выполнять выборочную регенерацию и конверсию сигналов только в критических точках, обеспечивая баланс между надёжностью и экономичностью.

Практическая значимость заключается в возможности использования полученных моделей при разработке и модернизации телекоммуникационных сетей, что особенно актуально в условиях роста трафика и ограниченности ресурсов.

Литература

1. Шахтанов, С. В. Направляющие системы электросвязи. Измерение оптических кабельных линий связи. Практикум: учебное пособие для вузов / С. В. Шахтанов, П. Н. Романов. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 200 с.
2. Скляров, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие для СПО / О. К. Скляров. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 268 с.
3. Варданян, В. А. Волоконно-оптическая DWDM-система Siemens Surpass hiT 7540/7550: учебное пособие для вузов / В. А. Варданян. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 116 с.
4. Ибрагимов, Р. З. Проектирование современных оптических транспортных сетей связи: учебное пособие для вузов / Р. З. Ибрагимов, В. Г. Фокин. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 112 с.
5. Варданян, В. А. DWDM-SCM-PON-сети: монография / В. А. Варданян. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 304 с.
6. Фокин, В. Г. Когерентные оптические сети: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 440 с.
7. Hall, M. N., Foerster, K.-T., Schmid, S., Durairajan, R. A survey of reconfigurable optical networks // Optical Switching and Networking. – 2021. – Vol. 41. – Article 100621. DOI: 10.1016/j.osn.2020.100621.
8. Sadeghi, R., Correia, B., Souza, A., Costa, N., Pedro, J., Napoli, A., Curri, V. Transparent vs translucent multi-band optical networking: Capacity and energy analyses // Journal of Lightwave Technology. – 2022. – Vol. 40, No. 11. – P. 3485–3500. DOI: 10.1109/JLT.2022.3158720.

9. Nath, P. K., Nath, R. On regenerator site selection in translucent optical network design // Telecommunication Systems. – 2022. – Vol. 80. – P. 587–604. DOI: 10.1007/s11107-022-00983-x.

10. Sousa, L., Drummond, A. C. Metropolitan optical networks: A survey on new architectures and future trends. – arXiv preprint, 2022.

11. Dey, S. K., Paul, S., Nandi, S. Design of CapEx and OpEx aware IP-over-WDM network // Computer Networks. – 2023. – Vol. 229. – Article 110123. DOI: 10.1016/j.comnet.2023.110123.