

Сравнительный анализ подходов к построению мобильных оптических транспортных сетей на основе радиально-кольцевых структур

Comparative analysis of approaches to the construction of mobile optical transport networks based on radial ring structures

Ясинский / Yasinsnskii S.

Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
ведущий специалист.
г. Санкт-Петербург

Бойко / Boyko A.

Алексей Павлович
(varenyxa89@gmail.com)
кандидат технических наук, доцент.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени
Маршала Советского Союза С. М. Буденного»
МО РФ (ВАС им. С. М. Буденного),
докторант кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Малиновский / Malinovskiy I.

Игорь Иванович
(malin65.igor@mail.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
преподаватель кафедры сетей связи
и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Султанов / Sultanov R.

Руслан Сергеевич
(malin65.igor@mail.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Селезнев / Seleznev A.

Андрей Васильевич
(andrsel@mail.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: мобильная оптическая транспортная сеть – mobile optical transport network; узловая основа – the nodal base; радиально-кольцевая структура – radial-ring structure; центр тяжести – center of gravity; оптический транспортный узел – optical transport hub; волоконно-оптический кабель – fiber-optic cable.

После рассмотрения математической модели в виде графа для развертываемых мобильных оптических транспортных сетей связи определены пять возможных основных топологических подходов для их построения на основе радиально-кольцевых структур, сравнительный анализ которых позволил выделить два наиболее конкурентных для практической реализации. Сформулированы обоснованные предложения, поясняющие, в каких случаях выбор каждого из подходов может быть наиболее предпочтительным по показателям затрат на расходование оптического кабеля, а также по количеству линейных оптических усилителей и оптических транспортных узлов на одну единицу.

After considering the mathematical model in the form of a graph for deployable mobile optical transport networks, five possible basic topological approaches for their construction on the basis of radial-ring structures are defined, the comparative analysis of which allowed us to select the two most competitive for practical implementation. Reasoned proposals are formulated, explaining in which cases the choice of each approach can be the most preferable in terms of the cost of optical cable consumption, as well as the number of linear optical amplifiers and optical transport nodes per one unit.

Введение

Оптические транспортные сети связи (ОТС) проектируются и (или) развертываются для совместного или раздельного использования в виде стационарной и мобильной компонент, что не всегда способствует получению наиболее эффективного системного проекта на основе единого обобщенного подхода к формированию наиболее оптимальной топологической структуры для каждого из составляющих ее уровней, т. к. для их физической реализуемости следует учитывать определенные отличия в требованиях и свойствах.

При проектировании и строительстве стационарной ОТС имеется значительно больше отводимого времени, выделяемого научного потенциала и вычислительных мощностей, чем для планирования и развертывания полевой ОТС. Полученные варианты стационарной ОТС могут быть с достаточной степенью точности спроектированы, включая возможность учета в математических моделях синтеза с учетом необходимости реализации требований к структурно-поточковой устойчивости (СПУ) сети, а также влияния внешних и внутренних дестабилизирующих факторов (ДСФ) на элементы сети.

В соответствии с Федеральным законом РФ от 07.07.2023 г. №126-ФЗ «О связи» и ГОСТ Р 53111–2008 должны выполняться требования к обеспечению устойчивости функционирования сетей электросвязи (СЭ) Единой сети электросвязи (ЕСЭ) РФ не только общего пользования (ОП), но и сетей ограниченного применения при следующих условиях функционирования [1, 2]:

- в мирное время;
- в чрезвычайных ситуациях;
- в условиях чрезвычайного положения.

Наряду с действующей стационарной ОТС особое внимание должно уделяться проблемам системного проектирования и развертывания мобильной ОТС с возможностью аренды из СЭ ОП оптического ресурса в виде оптических волокон (ОВ) и длин волн (ДВ) для повышения эффективности построения ОТС СН. Однако ввиду большой сложности формализованной постановки и решения задачи синтеза ОТС общего пользования и ограниченного применения в большинстве случаев предполагается проводить изначальную декомпозицию общей задачи синтеза топологической структуры сети на две последовательно решаемые подзадачи [3, 4]:

- формирование узловой основы (УО), т. е. оптимизация состава и местоположения (координат) оптических транспортных узлов (ОТУ);
- построение на базе сформированной УО линейной основы (ЛО), т. е. оптимизация расхода оптического линейно-кабельного оборудования и волоконно-оптического кабеля (ВОК).

Несмотря на первичность решения подзадачи формирования УО в сравнении с решением подза-

дачи построения ЛО, построение общей топологической структуры ОТС допускает возможность многократного чередования решений этих двух подзадач для получения наиболее эффективного результата системного проектирования с дальнейшей оптимизацией расхода оптического ресурса в виде ВОК, ОВ в ВОК и ДВ в ОВ.

Следует также учитывать, что в настоящее время для реализации многих разнородных инфокоммуникационных технологий наибольшее применение нашли следующие три типовые структуры [5]:

- односвязная радиальная (РС) с центральным узлом (ЦУ) и низкой СПУ;
- двухсвязная кольцевая (КС) со средней СПУ;
- трехсвязная радиально-кольцевая (РКС) с высокой СПУ, совмещающая односвязную РС с двухсвязной КС.

Следовательно, в случае научно обоснованного выбора одной из этих трех ТС для построения ОТС задача раздельной оптимизации УО и ЛО может быть сведена в единую задачу по оптимизации топологической структуры сети, но с учетом обеспечения требований к связности по независимым путям передачи информационных потоков (ИП) между корреспондирующими парами ОТУ проектируемой ОТС.

Для повышения СПУ магистральной транспортной сети связи ОП или транспортной сети связи СН как транспортных составляющих ЕСЭ РФ предъявляются требования по обеспечению высокой СПУ с числом независимых путей передачи ИП между ОТУ, равным не менее трем, что соответствует возможному выбору типовой трехсвязной РКС в качестве альтернативного варианта, который из-за разнообразности возможных подходов реализации на практике требует проведения дополнительного научного исследования в форме сравнительного анализа.

Математическая модель и основные топологические подходы для построения радиально-кольцевых структур оптических транспортных сетей связи

Для получения возможности более обоснованного выбора предпочтительной базовой типовой топологической структуры в той или иной сложившейся ситуации построения ОТС, а так же для обеспечения в дальнейшем возможности системного проектирования высоко устойчивых ОТС с коэффициентом связности три на основе выбора типовой РКС проводится сравнительный анализ типовых РС и КС по их относительным коэффициентам эффективности в среднегармоническом и среднегеометрическом представлении [6].

Типовую РКС для построения ОТС представим в виде графа

$$G(A = A_1 \cup a_0, B), \quad A_1 = \{a_i; i = \overline{1, N}\}, \\ B = \{b_{i,j}; i = \overline{1, N}, j = \overline{0, N}\}, \quad i \neq j, \quad (1)$$

где [4]: $A = A_1 \cup a_0$ – множество элементов сети с координатами вершин графа, называемое УО и представляемое в виде совокупности ОТУ, состоящего из совместного для РС и КС подмножества A_1 путем его объединения с центральным узлом a_0 ; B – множество ребер графа, называемое ЛО и реализуемое усилительными участками из ВОК для непосредственной передачи ИП по световым путям, образованным между любыми двумя ОТУ по ОВ в однокабельной волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

С целью проведения корректного сравнительного анализа известных методов формирования РКС при переходе от КС путем суперпозиции с РС за счет введения дополнительного узлового элемента a_0 в ряде случаев отказываются от непосредственной топологической привязки к местности в виде координат размещения узлов, а используют матрицу расстояний между узлами сети без учета рельефа местности и поправок возможного изменения длин прокладываемых (развертываемых) ВОК при влиянии внутренних и внешних ДСФ. В основу каждого из методов оптимизации структуры ОТС чаще всего закладывается процедура минимизации суммарной длины вводимых в топологическую структуру дополнительных ВОК как целевая функция (ЦФ):

$$L_{\text{доп.}} = \sum_{b_{i,j=0} \in B} l_{i,j=0} \rightarrow \min, i = \overline{1, N}, j = 0. \quad (2)$$

Разработка новых и совершенствование известных методик формирования УО для ОТС может быть произведена с наибольшей эффективностью только после проведения анализа возможного выбора метода определения центра тяжести (ЦТ) [7] как оптимальной координаты размещения ЦУ a_0 при переходе от КС к РКС в плане минимизации расхода ВОК на основе применения целевой функции (2). К наиболее предпочтительным методам формирования УО для ОТС на основе РКС с оптимально рассчитанными координатами ЦТ могут быть отнесены: метод определения центра тяжести (масс) с использованием физико-планиметрического подхода [8, 9], метод пробной точки [10], метод k -средних и кластерного анализа [11, 12]. Оптимально рассчитанный ЦТ для формирования РКС берется за основу размещения ЦУ a_0 , т. е. координаты ЦТ и ЦУ при наличии благоприятных физико-географических условий (ФГУ) должны быть совмещены или максимально близкими. При этом для построения ОТС на основе РКС предлагается выделять пять основных подходов к представлению их топологического различия с учетом (2).

Подход № 1. Типовая трехсвязная РКС, в которой координаты ЦУ a_0 совмещены с рассчитанными координатами ЦТ, что соответствует оптимальному значению целевой функции (2).

Подход № 2. Типовая трехсвязная РКС, в которой координаты ЦУ a_0 отклонены (смещены) относительно рассчитанных координат ЦТ в подходе № 1, но находятся во внутренних границах расположения всех ОТУ $A_1 = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ кольцевой структуры.

Подход № 3. Типовая трехсвязная РКС, в которой координаты ЦУ a_0 отклонены (смещены) относительно рассчитанных координат ЦТ в подходе № 1, но находятся за внешними границами расположения всех ОТУ $A_1 = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ кольцевой структуры.

Подход № 4. Двухсвязная РКС, в которой координаты ЦУ a_0 отклонены (смещены) относительно рассчитанных координат ЦТ в подходе № 1, но находятся на границе расположения всех ОТУ $A_1 = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ кольцевой структуры и функционально, географически и организационно-технически объединены с одним из $a_i \in A_1$, что позволяет совместить территориально два ОТУ и представлять их в виде одного совмещенного ОТУ $a_0 \cup a_i$, применяя для этого метод стягивания узлов связи [13].

Подход № 5. Двухсвязная РКС, в которой координаты ЦУ a_0 отклонены (смещены) относительно рассчитанных координат ЦТ в подходе № 1, но находятся на границе расположения всех ОТУ $A_1 = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ кольцевой структуры, а также функционально, географически и организационно-технически объединены с одним из $b_{i,j} \in B$ при $i = \overline{1, N}$ и $j = \overline{1, N}$.

Анализ приведенных выше пяти топологических подходов к расположению координат ЦУ a_0 относительно границ расположения всех ОТУ $A_1 = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ кольцевой структуры показал:

- подход № 1 является оптимальным в соответствии с ЦФ (2) и может быть использован для проведения сравнительного анализа с другими возможными подходами с целью оценки целесообразности использования каждого из них для построения трехсвязной ОТС;

- подход № 2 может оказаться наиболее предпочтительным в выборе для построения ОТС с учетом влияния ФГУ на реальную возможность развертывания ЦУ a_0 и с учетом минимального отклонения суммарного расхода ВОК относительно рассчитанного оптимального значения в подходе № 1;

- подходы № 3, № 4 и № 5 могут оказаться менее предпочтительным в выборе для построения ОТС, т. к. в них ЦУ a_0 существенно отклоняется от рассчитанного оптимального значения в подходе № 1, что приведет к значительному расходу ВОК;

- в подходах № 4 и № 5 структуры не трехсвязные, а двухсвязные, т. е. не позволяют обеспечивать требование к ОТС по обеспечению высокой СПУ;

- подход № 4 несмотря на больший расход ВОК в сравнении с оптимальным подходом № 1 может оказаться более предпочтительным в выборе для построения ОТС из-за совмещения территориально двух ОТУ в один ОТУ $a_0 \cup a_i$ и после принятия мер по увеличению связности по независимым путям

передачи ИП между любой из корреспондирующих пар ОТУ в ОТС от двух до трех единиц.

Приведенные выше результаты анализа пяти топологических подходов к расположению координат ЦУ a_0 относительно границ расположения всех ОТУ $A_i = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ кольцевой структуры позволяют сделать заключение об уместности проведения дополнительного исследования по оценке целесообразности построения ОТС на основе КРС, которая может быть представлена в виде модифицированного подхода № 4 (подход № 4М) со связностью три относительно двухсвязного подхода № 4 и на один ОТУ меньше в сравнении с подходом № 1.

Сравнительный анализ подхода № 1 с подходом № 4М для построения мобильных оптических транспортных сетей связи

В ходе планирования построения (развертывания) высокоустойчивой мобильной (полевой) ОТС лицами, принимающими решение о выборе того или иного подхода из двух наиболее целесообразных (подход № 1 и подход № 4М) по расходованию сил и средств (минимуму ВОК или сокращению количества ОТУ на один узел), следует учитывать положительные и отрицательные результаты расчетов для обоснования предпочтительности выбора наиболее целесообразного подхода в той или иной сложившейся обстановке по организации связи. С этой целью определим следующие одинаковые и наиболее упрощенные условия для проведения объективного сравнительного анализа между подходом № 1 и подходом № 4М на предварительном этапе перед проведением планирования развертывания мобильной ОТС:

– изначально для подхода № 1 исследуемую типовую трехсвязную РКС представим в виде правильного шестиугольного графа (рис. 1), который условно вписан в окружность радиусом R_0 с центром a_0 , а каждая из общих вершин РС и КС соответствует расположению ОТУ $a_i \in A$ при $i = \overline{1, 6}$;

– выбор правильной шестиугольной формы для подхода № 1 обосновывается равнозначностью суммарных длин ребер графа (длин ВОК) для РС и КС, полученных в результате расчетов для каждой из них в отдельности как составляющих общей РКС [5], а каждая из длин ребер в этом подходе равна радиусу R_0 , который примем за условную единицу длины ВОК, т. е.

$$R_0 = l_{i,j}(b_{i,j}) = 1 \text{ у.е.д., где } i = \overline{1, N}, j = \overline{0, N}; \quad (3)$$

– все линии связи ОТС представляют собой однокабельные двунаправленные ВОЛС, реализуемые на основе пар ОВ в мобильных ОК, например П-294Д-02-К2 или ОК-ВМ-4Т, для передачи/приёма оптических сигналов и формирования каналов передачи с одинаковой скоростью;

– с учетом выбранного правильного шестиугольника в подходе № 1 представим для наглядности и сравнительного анализа двухсвязную РКС для подхода № 4 на рис. 2 также в виде шестиугольной структуры.

Приведенная на рис. 1 типовая трехсвязная РКС (подход № 1) позволяет выполнять требование по формированию в рамках ОТС до трех независимых путей для любой возможной корреспондирующей пары ОТУ, а приведенная на рис. 2 двухсвязная РКС (подход № 4) позволяет выполнять требование

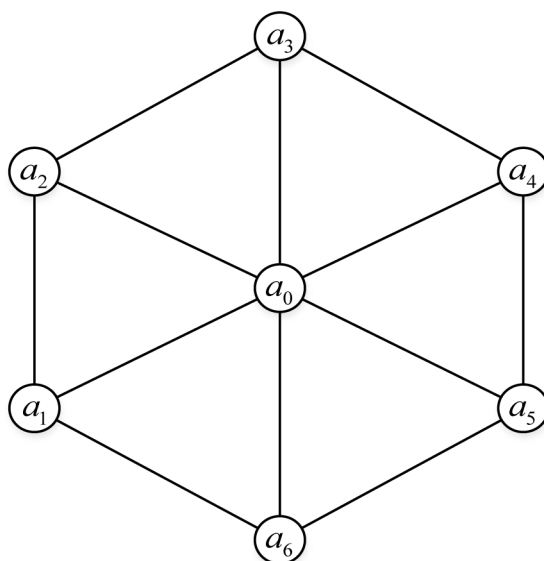


Рис. 1. Типовая трехсвязная РКС для подхода № 1

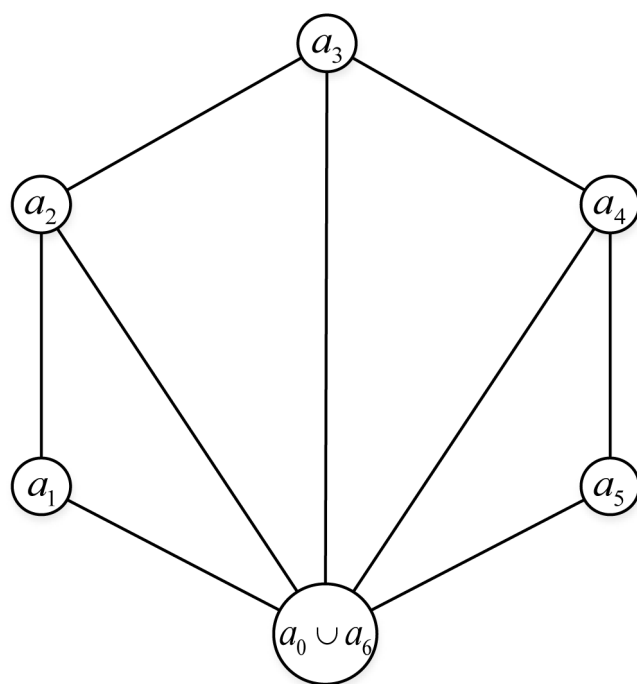


Рис. 2. Двухсвязная РКС для подхода № 4

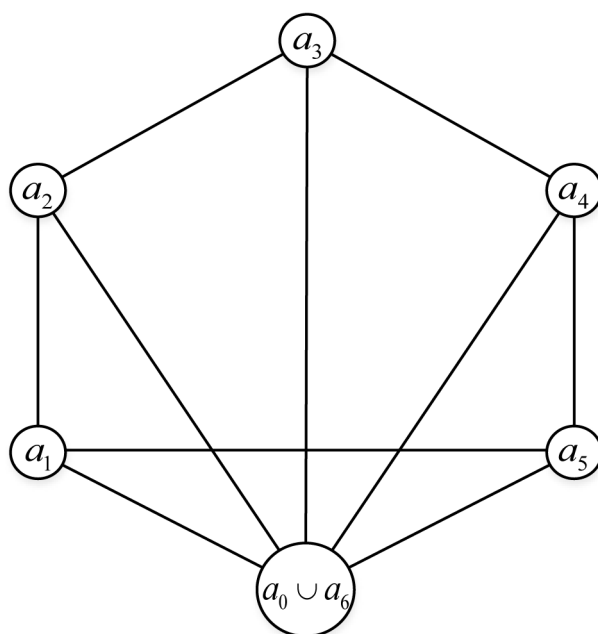


Рис. 3. Трёхсвязная РКС для подхода № 4М

по формированию в рамках ОТС до двух независимых противоположенных путей (НПНП) передачи световых потоков, что привело к необходимости принятия дополнительных мер (модификации подхода № 4, т. е. представив его как подход № 4М) ЛПР по устранению этого недостатка с целью восстановления связности до трех независимых путей с учетом минимального дополнительного расхода ВОК.

Для устранения недостатка в подходе № 4 (рис. 2) в научной работе [14] авторами предложено ввести одно дополнительное ребро $b_{1,5}$ (хорду) длиной $l_{1,5}$ между двумя смежными ОТУ (вершинами графа A_1 и A_5) с ОТУ $a_0 \cup a_6$ в кольцевой составляющей $A_1 = \{a_i; i = 1, 6\}$, что соответствует преобразованию применительно к подходу № 4 двухсвязной ОТС (графа) на рис. 2 в трехсвязную ОТС (граф) на рис. 3, которую будем использовать в качестве модифицированного подхода № 4М для проведения сравнительного анализа с подходом № 1.

Результаты расчетов для суммарных длин ребер в условных единицах длины (у. е. д.) ВОК (3) для подхода № 1 ($L_{\text{№1}}$) и подхода № 4М ($L_{\text{№4М}}$) с учетом известных формул из геометрии для правильного шестиугольника и тригонометрических функций приведены в таблице 1.

Анализ приведенных результатов расчетов в таблице 1 суммарных длин ребер ВОК в условных единицах длины (3) для подхода № 1 ($L_{\text{№1}}$) и подхода № 4М ($L_{\text{№4М}}$) показал наличие существенной экономии возможного расхода ВОК (до 10%) при развертывании мобильной ОТС с использованием подхода № 1. Однако, как было отмечено выше, в подходе № 4М наблюдается тенденция возможной экономии сил и средств, что объясняется меньшим числом развертываемых на местности ОТУ на одну единицу в сравнении с подходом № 1 [14], несмотря на то, что функциональные возможности в обоих подходах одинаковые. Следовательно, в качестве примера рассмотрим возможный вариант практической реализации этих двух подходов, представленных наглядно на рис. 1 и рис. 3, но при необходимости выполнения следующих условий:

- вместо $R_0 = 1$ у.е.д., введенного в виде (3) для подхода № 1, примем $R = l_{i,j}(b_{i,j}) = 10$ км, где $i = 1, N, j = 0, N$;
- длина максимально возможного развертываемого оптического усилительного участка (ОУУ) с использованием ВОК типа П-294Д-02-К2 не должна превышать допустимого значения $R_{\text{доп.}} = 14$ км, что связано с техническими возможностями приемо-передающих оптических модулей оконечного оборудования ВОЛС,

Таблица 1

Суммарные длины ребер для подхода № 1 и подхода № 4М

	Подход № 1	Подход № 4М	Разница между $L_{\text{№4М}}$ и $L_{\text{№1}}$
Суммарная длина ребер в у. е. д.	$L_{\text{№1}} = 12$	$L_{\text{№4М}} \approx 13,2$	$\Delta L = 1,2$ или 10%

Таблица 2

Результаты сравнительного анализа подхода № 1 с подходом № 4М

Сравниваемые параметры:	Подход № 1	Подход № 4М	Разница между $L_{\text{№4М}}$ и $L_{\text{№1}}$
количество распределенных на местности ОТУ	7, то есть $A_1 = \{a_i; i = 1, 6\}$ плюс a_0	6, т. к. $A_1 = \{a_i; i = 1, 6\}$, где $a_0 \cup a_6$	$7 - 6 = 1$
суммарная длина ребер в километрах	$L_{\text{№1}} = 12$	$L_{\text{№4М}} \approx 13,2$	$\Delta L = 1,2$ или 10%
количество НОУП (ОУ)	–	4 (8)	4 (8)

параметрами кабеля и соединительными элементами (энергетическими потерями в разъемах) строительных длин кабеля;

– в случае превышения развертываемого ОУУ допустимого значения $R_{\text{доп.}} = 14$ км возникает техническая необходимость дополнительной установки на стыках строительных длин кабелей необслуживаемых оптических усилительных пунктов (НОУП) с двумя оптическими усилителями (ОУ) в каждом для сохранения двух НППП передачи световых потоков.

В приведенной на рис. 1 типовой трехсвязной РКС (подход № 1) в соответствии с выражением (3) все длины ребер (ВОЛС) одинаковы и для нашего примера выполняется условие, т. к. $R = l_{i,j}(b_{i,j}) = 10 \text{ км} < R_{\text{доп.}} = 14 \text{ км}$, что устраняет необходимость дополнительной установки НОУП.

Что касается приведенной на рис. 3 трехсвязной РКС (подход № 4М), то в ней имеют место длины ребер (ВОЛС), превышающие допустимые значения $R_{\text{доп.}} = 14$ км. Проведенные расчеты позволили определить четыре ребра (ВОЛС) на рис. 4, которые больше $R_{\text{доп.}} = 14$ км: $l_{2,0\cup6}(b_{2,0\cup6}) \approx 17,3 \text{ км}$; $l_{4,0\cup6}(b_{4,0\cup6}) \approx 17,3 \text{ км}$; $l_{3,0\cup6}(b_{3,0\cup6}) = 20 \text{ км}$; $l_{1,5}(b_{1,5}) \approx 17,3 \text{ км}$. Следовательно, для каждого из четырех ребер (ВОЛС), превышающих $R_{\text{доп.}} = 14$ км, возникает необходимость в дополнительном развертывании НОУП с двумя ОУ в каждом, что в итоге составляет четыре НОУП с восемью ОУ. Результаты проведенного сравнительного анализа подхода № 1 с подходом № 4М в рамках данного примера и с учетом заданных условий построения ОТС сведены в таблицу 2.

Анализ полученных результатов в таблице 2 при сравнении подхода № 1 с подходом № 4М на основе одного из возможных примеров реализации ОТС в виде шестиугольной РКС показал, что:

– несмотря на преимущество подхода № 1 над подходом № 4М по количеству распределенных на местности ОТУ на одну единицу, этот подход существенно уступает в дополнительных расходах на развертывание ВОК (на 10%) и затрат на внедрение в ВОЛС оборудования НОУП (4 комплекта) с восемью ОУ;

– каждый из ОУ требует значительных затрат на приобретение и принятия мер по обеспечению функционирования при отрицательных температурах окружающей среды (более нуля градусов по Цельсию).

Заключение

После проведения рассмотрения пяти возможных практических подходов построения (развертывания) мобильных ОТС с использованием полевого ВОК были выделены два из пяти наиболее перспективных альтернативных подходов:

– подход № 1, наглядно представленный в виде шестиугольной структуры на рис. 1;

– подход 4М, наглядно представленный в виде шестиугольной структуры на рис. 3.

Сравнительный анализ этих двух альтернативных структур позволил выделить наличие значительного превосходства в плане минимизации экономических расходов по стоимости на расходы на ВОК в соответствии с целевой функцией (2) и затрат на внедрение дополнительного линейного оборудования в виде НОУП (ОУ).

Несмотря на экономическое преимущество по затратам подхода № 1 над подходом № 4М может оказаться, что в силу складывающихся оперативных и организационно-технических условий и обстановки по связи, а также в результате необходимости учета ФГУ и влияния внешних ДСФ, экономическое преимущество подхода № 1 над подходом № 4М может оказаться не главным для его приоритетного выбора.

Следовательно и иные подходы, которые нами были исключены из сравнительного анализа в экономическом плане преимущества, при определенных условиях могут быть использованы для практической реализации, памятуя о значительных затратах на их реализацию в сравнении с наиболее оптимальным подходом № 1, который предлагается брать в качестве эталонного с учетом достижения целевого результата (2) и экономии затрат на дополнительное введение НОУП (ОУ) в ВОЛС. Кроме этого, не исключается возможность построения мобильных ОТС на основе РС или КС, но после проведения обоснования их выбора на основе сравнительного анализа с РКС по среднегеометрическим и среднегармоническим относительным коэффициентам эффективности [15].

Литература

1. О связи : федеральный закон от 07.07.2003 N 126-ФЗ ; в ред. от 30.12.2021 (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2022) // Собрание законодательства РФ. Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102082548> (дата обращения: 27.02.2025).
2. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 17 с.
3. Давыдов, Г. Б. Сети электросвязи / Г.Б. Давыдов, В.Н. Рогинский, А.Я. Толчан. – Москва : Связь, 1977. – 360 с.
4. Обобщенный подход к моделированию устойчивой структуры оптической транспортной сети связи / С.А. Ясинский, В.М. Соколов, В.А. Усацкий [и др.] // Информация и Космос. – 2024. – № 3. – С. 13–18.
5. Ясинский, С. А. Сравнительный анализ базовых типовых структур для построения кабельных локальных вычислительных, телекоммуникационных сетей и сетей доступа / С.А. Ясинский // Информация и Космос. – 2020. – № 4. – С. 32–38.
6. Алгебраический метод определения области допустимой эффективности радиально-кольцевой типовой структуры / С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин, П.Г. Романенко, Б.Г. Репин // Электросвязь. – 2022. – № 12. – С. 22–26.

7. Гашков, С. Б. Центры тяжести и геометрия / С.Б. Гашков. – Москва : МЦНМО, 2015. – 64 с.
8. Уотерс, Д. Логистика. Управление цепью поставок / Д. Уотерс ; пер. с англ. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 503 с.
9. Прасолов, В. В. Задачи по планиметрии / В.В. Прасолов. – Москва : МЦНМО, 2022. – 640 с.
10. Гаджинский, А. М. Логистика / А.М. Гаджинский. – Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2007. – 472 с.
11. Аббакумов, В. Л. Бизнес-анализ информации. Статистические методы / В.Л. Аббакумов, Т.А. Лёзина. – Москва : Экономика, 2009. – 374 с.
12. Осипова, Ю. А. Применение кластерного анализа методом k -средних для классификации текстов научной направленности / Ю.А. Осипова, Д.Н. Лавров // Математические структуры и моделирование. – [Электронный ресурс]. – 2017. – № 3 (43). – URL : <http://msm.univer.omsk.su/jrns/jrn43/OsipovaLavrov.pdf> (дата обращения: 06.11.2024).
13. Ясинский, С. А. Моделирование радиально-двух-кольцевой типовой структуры транспортной сети методом стягивания узлов связи / С.А. Ясинский // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17, № 5. – С. 42–47.
14. Горай, И. И. Оптимальное построение адаптивных сетей связи / И.И. Горай, Д.А. Журавлев, Е.В. Калайтанова // Известия Тульского государственного университета. – 2022. – № 12. – С. 313–322.
15. Ясинский, С. А. Обоснование выбора топологической структуры волоконно-оптической сети связи общего пользования / С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Электросвязь. – 2021. – № 3. – С. 43–47.