# Формализованный подход к применению метода наложения для принятия решения на модернизацию и развитие транспортных сетей связи

## Formalized approach to application of overlay method for making decision regarding upgrade and development of transport communication networks

**Сторожук / Storozhuk N.**
Николай Леонидович
(snl@loniis.ru)
кандидат технических наук.
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи» (ЛО ЦНИИС),
и.о.директора филиала.
г. Санкт-Петербург

**Зюзин / Zyuzin A.**
Александр Николаевич
(alexz01@bk.ru)
кандидат технических наук.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного»,
преподаватель.
г. Санкт-Петербург

**Ясинский / Yasinsky S.**
Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
ЛО ЦНИИС,
научный консультант.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: телекоммуникационная система – telecommunication system; транспортная сеть связи – transport communication network; метод наложения – overlay method; спектральное уплотнение каналов – wavelength-division multiplexing; минимальное взвешенное покрытие – minimum weighted coverage.

В статье описывается формализованный подход к применению метода наложения для модернизации фрагмента транспортной сети связи средствами технологии Wavelength-division multiplexing (WDM) – спектрального уплотнения каналов. Предлагается разделить процесс на три этапа. На первом этапе определить топологию модернизируемых линий связи, решив задачу на минимальном взвешенном покрытии. На втором – рассчитать необходимое количество спектральных каналов для каждой линии связи. На третьем этапе произвести энергетический расчет каждой модернизируемой линии связи с учетом текущих характеристик кабельно-линейных сооружений и параметров устанавливаемого оборудования.

The article describes a formalized approach to application of overlay method for upgrade of transport communication subnetwork using Wavelength-division multiplexing (WDM) technology. The process is suggested to be divided into three stages. At the first stage topology of upgradable communication lines shall be determined after solving the problem using minimum weighted coverage. At the second stage the required number of spectral channels for each communication line shall be calculated. At the third stage energy calculation shall be made for each upgradable communication line based on current characteristics of cable and line infrastructure and parameters of the equipment to be installed.

Правительство Российской Федерации утвердило систему реализации программы цифровой экономики в стране, целью которой является формирование полноценной цифровой среды. По мнению властей, именно «цифровизация» экономики позволит России решить вопрос глобальной конкурентоспособности и национальной безопасности, а также будет способствовать практической реализации наиболее приоритетных направлений развития нашей страны [1]. 18 декабря 2017г. правительственной комиссией по использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности утвержден план мероприятий по направлению «Информационная инфраструктура» программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [2]. В рамках плана мероприятий разработана Генеральная схема развития сетей связи Российской Федерации на период 2018–2024 годов. Реализации данной программы потребует существенного увеличение пропускной способности линий связи, но при этом должны учитываться особенности модернизации и развития транспортной составляющей сетей связи, то есть транспортных или первичных сетей связи, которые определяют потенциальные и реально достижимые показатели функционирования телекоммуникационных сетей [3].

Для принятия решения на модернизацию и развитие транспортных сетей (ТрС) Единой Сети Электросвязи (ЕСЭ) РФ важно учитывать ее консервативность, которая заключается в высокой стоимости развертывания и,



4 2018.indd 15 12.12.2018 17:10:14

следовательно, в длительном времени функционировании, в течение которого сменятся несколько поколений информационных сервисов и систем ЕСЭ РФ.

Рациональное развитие ТрС ЕСЭ РФ должно производиться на этапах ее реконструкции и последующего строительства, которое в общем случае может осуществляться в двух основных направлениях:

- модернизации и развитии участков существующих сетей;
- построения новых участков сети.

Как показывает мировой опыт, при модернизации существующих участков первичных сетей и ТрС ЕСЭ РФ может быть использовано сочетание методов замещения и наложения [3, 4, 5].

Метод замещения заключается в постепенной замене устаревшего оборудования ТрС ЕСЭ РФ за счет реконструкции волоконно-оптических, кабельных, радиорелейных и тропосферных линий передачи. Это эволюционно-длительный процесс, который зависит как от наличия инвестиционных возможностей операторов связи, так и от текущих потребностей пользователей в услугах связи.

Метод наложения обеспечивает модернизацию ТрС ЕСЭ РФ путем построения цифровой сети нового поколения, функционирующей параллельно существующей. Этот процесс может проходить поэтапно на выбранных участках сети и не влияет на работу существующего оборудования.

Для обеспечения требуемой связности и разветвленности наложенной цифровой сети ТрС ЕСЭ РФ нового поколения могут:

- использоваться свободные волокна, проложенных ранее волоконно-оптических кабелей;
- задействоваться резервные и свободные стволы радиорелейных систем передачи;
- использоваться технологии спектрального уплотнения каналов (СУК) для существующих волоконно-оптических линий связи (ВОЛС);
- образовываться «пакетные» каналы в групповых каналах и трактах цифровых систем передачи и наоборот.

Наиболее интересным с точки зрения затрат и открывающихся возможностей для метода наложения является использование технологии СУК для ВОЛС. Суть этого подхода заключается в том, что на существующих участках ВОЛС устанавливается необходимое оборудование СУК, которое позволяет передавать высокоскоростные информационные потоки одновременно на нескольких длинах волн оптического диапазона в одном оптическом волокне. Однако на одной из формируемых длин волн продолжает работать система передачи старшего поколения, а на остальных длинах волн можно разворачивать современное оборудование. Соответственно, потенциальная пропускная способность каждого оптического волокна в ВОЛС увеличивается пропорционально количеству сгенерированных длин волн с сохранением существующих систем передачи [3, 4].

Решение задачи модернизации ТрС ЕЭС РФ методом наложения с использованием технологии СУК на всех участках существующих сетей связи это трудоемкий и финансово не оправданный процесс. Эффективно решить задачу модернизации ТрС ЕЭС РФ возможно только после оценки планируемых объемов увеличения пропускной способности на приоритетных направлениях связи.

В то же время, важно понимать физические особенности технологии СУК при ее использовании для модернизации существующих ВОЛС, которые заключаются:

1) в необходимости увеличения оптического бюджета ВОЛС, который будет использован для обеспечения процессов мультиплексирования и демультиплексирования разных длин волн в одном оптическом волокне;

2) в необходимости учета дисперсионных характеристик кабеля и мероприятий по компенсации дисперсии с учетом увеличивающихся скоростей передачи;

3) в необходимости учета и компенсации нелинейных эффектов многоволного сигнала в ВОЛС, вызывающего перекрестные помехи: четырехволновое смешение (*FWM – Four Wave Mixing*) и перекрестную фазовую модуляцию (*XPM – Cross Phase Modulation*).

Следовательно, перед принятием решения на модернизацию участка ТрС методом наложения с использованием СУК необходимо учитывать не только требования по обеспечению переноса информационных потоков, но и реальные характеристики существующих ВОЛС.

Учитывая рассмотренные особенности целесообразно разделять процесс принятия решения на модернизацию участка ТрС методом наложения с использованием технологии СУК на три этапа.

1. На первом этапе выделять наиболее важные с точки зрения пропускной способности линии связи участки ТрС между корреспондирующими парами узлов (КПУ), которые будут планироваться для модернизации.

2. На втором этапе, исходя из планируемых потребностей в пропускной способности между КПУ, определять количество длин волн (спектральных каналов) и их пропускную способность для каждой модернизируемой линии связи.

3. На третьем этапе проводить проверочные расчеты на возможность установки оборудования СУК для каждой модернизируемой линии связи. В случае отрицательного результата проверочного расчета потребуется производить корректировку перечня модернизируемых линии связи участка ТрС.

Для математической формулировки (формализованной постановки) решаемых задач подобного класса предлагается использовать известные элементы моделирования из теории графов. Структуру фрагмента ТрС смоделируем при помощи ненаправленного графа $G=\{A,B,U,L\}$. В этом графе множество вершин $A=\{a_i;\ i=\overline{1,N}\}$ соответствует множеству узлов фрагмента ТрС с общим числом $N$, а множество ребер $B=\{b_{ij};\ i,j=\overline{1,N};\ i\neq j\}$ описывает линии пере-



4 2018.indd 16 12.12.2018 17:10:15

дачи между этими узлами, на котором определены: матрица пропускных способностей (спектральных каналов) $U=\{u_{ij};\ i,j=\overline{1,N};\ i\neq j\}$ и значения длин линий передачи $L=\{l_{ij};\ i,j=\overline{1,N};\ i\neq j\}$. Кроме того, обозначим множество КПУ $Z=\{z_m;m=\overline{1,M}\}$, где М – общее количество КПУ.

Упрощенная блок-схема для принятия решения на модернизацию участка ТрС методом наложения с использованием технологии СУК представлена на рис. 1.

Для оценки наиболее важных с точки зрения увеличения пропускной способности линии связи между корреспондирующими парами узлов ТрС предлагается использовать известный подход, который формулируется и решается как задача линейного булева программирования – о минимальном взвешенном покрытии множества возможных сечений путей различных направлений связи (КПУ) минимальным количеством ребер сети.

Для формулировки задачи о минимальном взвешенном покрытии необходимо определить множество допустимых сечений между КПУ и представить их матрицей сечений *S*.

Каждая строка формируемой матрицы *S* должна соответствовать одному из сечений множества *K*, а каждый столбец одному из ребер множества *B*. Элементы матрицы определяются следующим образом:

$$s_{ij}^{k}=\begin{cases}1, & \text{если } b_{ij} \text{ ребро принадлежит } k\text{-му сечению } (k=\overline{1,K});\\ 0 & \text{– в противном случае.}\end{cases}$$

Далее решается задача взвешенного покрытия матрицы *S*, как оптимизационная задача линейного булева программирования, путем нахождения такого подмножества столбцов (ребер) с минимальной длиной, в котором каждая строка (сечение) содержит единицу хотя бы в одном из выбранных столбцов. За счёт исключения найденного множества ребер из сети покрывается все множество сечений фрагмента ТрС для $z_m$-ой КПУ.

Для формулировки этой задачи в виде задачи линейного программирования удобно ввести дополнительные булевы переменные:

$$w_{ij}=\begin{cases}1, & \text{если } b_{ij} \text{ ребро включено во взвешенное покрытие;}\\ 0 & \text{– в противном случае.}\end{cases}$$

В этом случае задача о минимальном взвешенном покрытии будет иметь следующий вид:

$$\sum_{b_{ij}\in B} l_{ij}w_{ij} \Rightarrow \min;$$

$$\sum_{b_{ij}\in B'} s_{ij}^{k}w_{ij}\geq 1;\ k=\overline{1,K};$$

$$s_{ij}^{k}\in\{0,1\},\ w_{ij}\in\{0,1\}.$$

Найденные ребра сети, с точки зрения оптимального выбора, должны иметь наименьшую протяженность и покрывать наибольшее количество найденных сечений, что приводит к определению топологии модернизируемых линий связи ТрС средствами технологии СУК.

Для оценки условий физической реализуемости технологии СУК на выбранных линиях связи (ребрах сети) требуется уточнить количество и пропускную способность длин волн (спектральных каналов) для каждой из них – определить потоковую структуру модернизируемых линий связи средствами технологии СУК.

Для этого необходимо учитывать номенклатуру и количество существующих и вновь образуемых каналов и трактов различного типа между КПУ. Искомая потоковая структура должна удовлетворять потребности в передаче потоков между КПУ:

$$\sum_{\lambda=1}^{\Lambda} x_{z_m}^{\lambda}\geq V_{z_m},\ m=\overline{1,\mathrm{M}};$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{\lambda=1}^{\Lambda} b_{ij}^{\lambda}x_{z_m}^{\lambda}\leq u_{ij};$$

$$x_{z_m}^{\lambda}\geq 1,\ m=\overline{1,\mathrm{M}},$$

где $\Lambda$ – количество длин волн для $z_m$-ой КПУ; $x_{z_m}^{\lambda}$ – мощность потока, направляемого по $\lambda$-ой длине волны;

$$b_{ij}^{\lambda}=\begin{cases}1, & \text{если } \lambda \text{ длина волны проходит через } b_{ij}\$b_{ij}\\ 0 & \text{– в противном случае;}\end{cases}$$

$V_{z_m}$ – требуемая мощность потока $z_m$-ой КПУ.

Далее решается задача рационального выбора маршрутов (путей) и назначения длин волн (*Routing and Wavelength Assignment*). Эта задача состоит в выборе оптимального маршрута между КПУ и назначения длин волн исходя из приоритетных условий: минимального расстояния, минимального количества промежуточных узлов, наличия свободных длин волн на участке и минимального количества преобразований длин волн на маршруте [6, 7]. Сложность решения подобного класса задачи на рассматриваемом этапе модернизации ТрС будет минимальной по причине минимизации количества модернизируемых линий. Однако при расширении фрагмента ТрС с СУК и использовании устройств для конвертирования длин волн (кроспондеры, мукспондеры, транспондеры и др.) задача рационального выбора маршрутов (путей) и назначения длин волн будет усложняться.

Результатом определения количества и пропускной способности длин волн должна быть получена уточненная матрица пропускных способностей $U=\{u^{\lambda}{}_{ij}\}$, выбранных для модернизации линий связи.

После решения задачи рационального выбора маршрутов (путей) и назначения длин волн проводится проверочный расчет на возможность установки оборудо-



4 2018.indd 17 12.12.2018 17:10:16

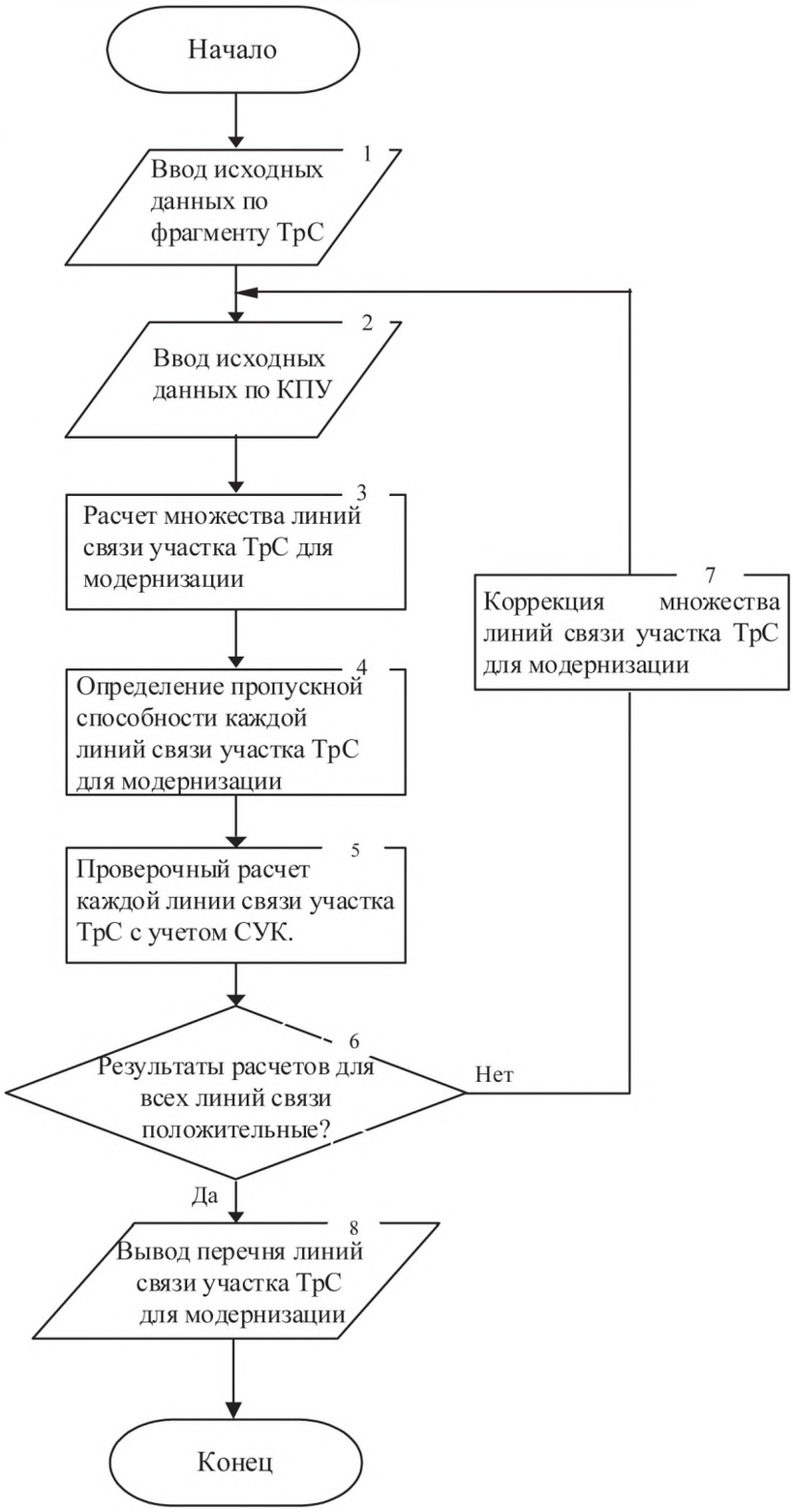


*Рис. 1. Блок-схема принятия решения на модернизацию участка ТрС методом наложения с использованием технологии СУК*



4 2018.indd 18 12.12.2018 17:10:17

вания СУК для каждой модернизируемой линии связи исходя из характеристик имеющегося волоконно-оптического линейного тракта и выбранного оборудования систем передачи СУК с его индивидуальными особенностями (мощности излучателей, чувствительности приемников, шумовых характеристик и т.д.), использования, если это необходимо, дополнительных оптических усилителей, устройств компенсации дисперсии и др. Для проверочного расчета бюджета мощности модернизируемых линий связи можно использовать известные методики и расчетные модули, предоставляемые производителями оборудования [8, 9, 10].

Таким образом, в результате использования приведенного в настоящей статье формализованного подхода к применению метода наложения для принятия решения на модернизацию и развитие транспортных сетей связи формируется структура линейного тракта для каждой модернизируемой линии передачи ТрС с СУК. В случае получения отрицательного результата при проверочном расчете выбранная линия связи исключается из дальнейшего рассмотрения, а расчет повторяется с начала (рис.1.). Перед окончательным принятием решения на модернизацию линий связи необходимо провести все необходимые измерения и соответствующие проектно-изыскательские работы для учета конкретных эксплуатационных показателей линий связи (оптические длины однородных участков, реальные потери оптической мощности на сростках, вставках, соединениях, возможности по размещению и электропитанию оборудования и т.д.).

Предложенных подход позволяет: оптимально с точки зрения необходимых направлений связи производить наращивание пропускных способностей на ТрС ЕСЭ РФ с минимальными затратами на кабельно-линейные сооружения; модернизировать фрагменты ТрС ЕСЭ РФ поэтапно, в зависимости от ближайших прогнозируемых потребностей и оперативно наращивать пропускную способность ТрС ЕСЭ РФ на требуемых участках развиваемой транспортной сети связи.

## Литература

1. Распоряжение от 28 июля 2017 года №1632-р. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://government.ru/docs/28653/, свободный. – Загл. с экрана.

2. ПРИЛОЖЕНИЕ № 3 к протоколу заседания Правительственной комиссии по использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 18 декабря 2017 г. № 2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://static.government.ru/media/files/DAMotdOImu8U89bhM7lZ8Fs23msHtcim.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

3. Грязев, А. Н. Методы развития транспортных сетей связи для цифровой экономики РФ / А.Н. Грязев, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Вестник связи. – 2018. – № 2. – С. 19–22.

4. Грязев, А. Н. Многослойная графовая модель для модернизации и развития транспортных сетей связи / А.Н. Грязев, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Вестник связи. – 2018. – № 5. – С. 13–16.

5. Рунеев, А. Ю. Концепция ТСС. Первичные сети связи. Концепция создания и развития первичной сети территориальной системы связи / А.Ю. Рунеев, Н.А. Зюзин // Телекоммуникационные технологии. – 2001. – Вып. 1. – С. 3–13.

6. Подход к выбору маршрутов и назначению длин волн в транспортных сетях со спектральным уплотнением на основе волнового алгоритма / В.В. Ефимов [и др.] // Электросвязь. – 2017. – № 7. – С. 28–30.

7. Алгоритм выбора маршрутов и назначения длин волн в транспортных сетях связи со спектральным уплотнением / К.В. Лыжинкин [и др.] // ТРУДЫ ЦНИИИС. Санкт-Петербургский филиал. – 2017. – Т. 1 (4). – С. 159–165.

8. Спектральное уплотнение wdm уровня stm-64 (10g) от Натекс. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.nateks.ru/publication/spektralnoe-uplotnenie-wdm-urovnya-stm-64-10g-ot, свободный. – Загл. с экрана.

9. Калькулятор оптического бюджета. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.prointech.ru/kb/opticheskij-byudzhet/kalkulyator-opticheskogo-byudzheta.html, свободный. – Загл. с экрана.

10. Link Loss Budget Worksheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.corning.com/ru/ru/products/communication-networks/resources/system-design-calculators/link-loss-budget-calculator.html, свободный. – Загл. с экрана.



4 2018.indd 19 12.12.2018 17:10:17