

Об оптимизации трассы прокладки оптического кабеля

© В.П. Степанов, П.В. Степанов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Выбор трассы прокладки оптического кабеля формализован в виде задачи определения минимального и близких к ней путей на графе. Для решения задачи предложена модификация алгоритма Дейкстры. Трасса прокладки отображается на электронной карте города.

Ключевые слова: *оптический кабель, трасса прокладки, путь на графе, модифицированный алгоритм Дейкстры, электронная карта города.*

Введение. Оптический кабель (ОК) получил широкое применение во всех областях городской инфраструктуры. «Волокно в каждый дом» — это термин, используемый провайдерами для обозначения широкополосных телекоммуникационных систем, базирующихся на подведении оптического кабеля до пользователя. ОК в этом случае обеспечивает скоростной доступ в Интернет, услуги телефонной связи, телевизионного приема, гарантируя хорошую помехозащищенность и большую скорость передачи информации. ОК состоит из скрученных по определенной системе оптических волокон из кварцевого стекла, которые заключены в общую защитную оболочку. При необходимости кабель может содержать упрочняющие и демпфирующие элементы.

Существующие типы кабелей по своему назначению можно условно разделить на две группы — магистральные и городские [1]. Магистральные ОК предназначены для передачи информации на большие расстояния и имеют значительное число каналов. Они должны обладать малым затуханием и большой пропускной способностью. Типовые строительные длины для оптоволоконного кабеля магистральных линий связи составляют 4...6 км. Городские кабели применяют для соединения автоматических телефонных станций и узлов связи. Они используются на коротких расстояниях (до нескольких десятков километров) и имеют большое число каналов. Как правило, эти ОК работают без промежуточных линейных регенераторов. В местах стыковки строительных длин предусматривается технологический запас по длине, который позволяет провести монтаж кабеля. Запас по длине сворачивается, не нарушая разрешенный радиус изгиба, и смонтированная кабельная муфта укладывается на глубину прокладки в грунт. Для обеспечения защиты кабель и муфту накрывают прочными материалами.

Условия прокладки оптических кабелей. В зависимости от особенностей территории и поставленных целей используют следующие способы прокладки ОК: в специальную кабельную канализацию, непосредственно в грунт, внутри зданий, в туннелях и коллекторах. При прокладке не должны превышать нормируемые документацией на кабели механические воздействия, климатические условия, допустимые радиусы изгиба оптического кабеля [1, 2]. Радиус изгиба при прокладке ОК не должен быть менее 20 наружных диаметров кабеля. Не допускается превышение тягового усилия, нормируемого для конкретного типа кабеля. Непосредственному выбору трассы прокладки ОК предшествует этап тщательного изучения возможных вариантов трасс. Необходимость подобной подготовки обуславливается важностью поиска трассы минимальной длины.

При прокладке кабеля в туннелях и коллекторах непременно должна использоваться оболочка, не распространяющая горение. На сегодня кабель чаще всего прокладывают с использованием кабельной канализации. Основной мерой предосторожности при этом является противодействие возможным повреждениям, для чего применяется специальная броня из гофрированной стальной ленты. Если же канализация располагается на местах с повышенными требованиями к устойчивости электромагнитным воздействиям, используют ОК с бронированным покрытием. При осуществлении прокладки в этом случае важна герметизация кабельной канализации и четкий контроль тягового усилия. Для этой цели обычно используют автоматические лебедки. Тяговое усилие зависит от наличия изгибов трассы прокладки оптического кабеля.

Прокладка ОК в защитную полиэтиленовую трубу (ЗПТ) — основной способ прокладки кабеля в Европе. Сегодня он широко используется и в России. Внутренняя поверхность трубы покрыта антифрикционным материалом, снижающим коэффициент трения. ЗПТ надежно защищают ОК от механического повреждения, поэтому для организации оптоволоконной линии с использованием ЗПТ в основном используют недорогие небронированные ОК. При проведении земляных работ повреждение кабеля исключается полностью, поскольку он вводится в ЗПТ только после завершения ее укладки. Возможна укладка нескольких труб подряд с учетом последующего расширения сети, которая может быть осуществлена без дополнительного проведения земляных работ. ЗПТ дает возможность замены устаревшего кабеля без особых сложностей и затрат, а также прокладки кабеля большой строительной длины без разреза. ЗПТ обычно прокладывают бестраншейным способом или путем помещения кабеля в открытую траншею. При прокладке труб нельзя превышать допустимых радиусов изгиба кабеля.

При организации оптоволоконной линии связи сегодня обычно используют следующие методы прокладки ОК в ЗТП: ручное затягивание кабеля при помощи специального троса, механизированное затягивание при помощи троса, пневматический поршневой метод. Затягивание ОК является самым доступным методом, но дальность прокладки при этом значительно меньше, чем при пневматическом способе, поэтому при строительстве трасс большой протяженности этот метод применяют редко. Прокладка кабеля на небольшом участке от нескольких метров до 1 км обычно происходит при использовании этого метода. Пневматический метод прокладки кабеля в ЗТП очень эффективен. При его применении возможна прокладка ОК на расстояние до 4...6 км благодаря специальным устройствам для воздушной задувки.

При прокладке ОК на городском участке сети используются существующие линейные сооружения: кабельная канализация, коллекторы, туннели. Исходя из соображений пожарной безопасности ОК, прокладываемые в коллекторы и туннели, должны иметь оболочку из материала, не распространяющего горение. Выбор способа прокладки зависит от типа ОК. Расширенные условия применяются во время прокладки ОК в специальные трубы, в кабельную канализацию. При выборе трассы должны учитываться условия осуществления прокладки, а в случае больших пролетов должна быть тщательно спланирована еще и возможность доступа к трассе кабеля для выполнения работ. Общая возможная длина секции кабеля определяется бюджетом линии — максимальными потерями сигнала. Существуют ограничения на растягивающее усилие при прокладке кабеля при его установке [2]. Допустимые максимальные значения натяжения зависят от типа кабеля. Избыточные усилия при прокладке приводят к постоянному удлинению кабеля, вызывая его повреждение из-за обрыва оптических волокон.

Избыточный кабель вытягивается и организуется в виде петель внутри кабельных колодцев для облегчения сращивания. В норме для этих целей выделяется дополнительные 5% от длины пролета, которые сохраняются в процессе установки в виде петель через регулярные промежутки. Петли с допустимым радиусом изгиба укладываются в каждом кабельном колодце.

Планирование трассы прокладки ОК включает в себя следующие этапы: влияние сварки и оптических разъемов на длину секции до соседнего регенератора, строительные длины ОК, допуск на дополнительное число срастков и/или оптических разъемов, характер трассы и условия допуска персонала для прокладки и обслуживания. При этом учитываются топография местности и условия осуществления прокладки кабеля. Более тонкий кабель дает возможность использо-

вать несколько труб меньшего диаметра. На бюджет линии — максимальные потери сигнала в кабеле — оказывают влияние затухание сигнала в волокнах, число оптических разъемов. Для быстрого восстановления связи в случае обрыва ОК часто закладывается резервный кабель длиной, равной наибольшей длине проложенного в кабелепроводе кабеля.

Кабелепровод прямоугольного сечения изготавливают из высокоплотного полиэтилена. Его внутренние и внешние стенки могут иметь продольные ребра или гофрированную поверхность для облегчения процесса протягивания кабеля при прокладке. Изгиб кабелепровода не должен превышать минимально допустимого радиуса изгиба.

Формирование графа возможных трасс прокладки кабеля.

Для формирования графа используется масштабированная электронная карта района города со зданиями и кабельными каналами с указанием длин участков, как, например, на рис. 1. На карту наносят точки входа и выхода оптического кабеля в здания. Заданный район имеет один источник информации в виде автоматической телефонной станции в точке I и ряд потребителей. На карте указаны длины коллекторов связи между зданиями. На основе этой карты строится граф возможных трасс прокладки для заданного района города. Подводы к зданиям здесь обозначаются как вершины графа. Точки разветвления кабельных каналов также являются вершинами графа. В роли ребер выступают кабельные каналы. Пример сформированного графа представлен на рис. 2.

Постановка задачи. Известными для решения задачи является сформированный граф возможных трасс прокладки с указанием начальной и конечной точек ОК. Необходимо определить трассу прокладки минимальной длины между двумя точками и все близкие к нему в заданном диапазоне отклонения от минимальной длины трассы. Проектировщик на полученных решениях анализирует неучтенные дополнительные требования. Например, в числе таких условий может быть количество изгибов на трассе. Часто некоторые условия для прокладки ОК достаточно трудно формализовать. Кроме того, любая математическая модель не учитывает многих факторов, влияющих на результат. Например, к такому условию можно отнести доступность трассы для проведения работ. Поэтому рассматривается поиск оптимальной трассы и всех близких к ней трасс в заданном диапазоне отклонения длины ОК от оптимального.

Множество всех возможных трасс прокладки оптического кабеля представляется в виде неориентированного графа $G = (A, W)$, где A — множество вершин, W — множество дуг [3]. Вершинам этого графа соответствуют источник информации $i \in A$, потреби-

тель $j \in A$ и узлы ветвления трассы. Вершины графа — это места кабельных каналов, где имеются возможности выбора дальнейшей прокладки кабеля. Ребрам графа соответствуют кабельные каналы между двумя вершинами. Для всех ребер графа определяется матрица расстояний $L = |l_{sd}|s, d \in A$. Для заданных начальных и конечных вершин графа i и j требуется определить трассу прокладки R_{ij} минимальной длины, а также множество всех близких к минимальной длине трасс, которые отличаются от оптимального на заданную величину E .

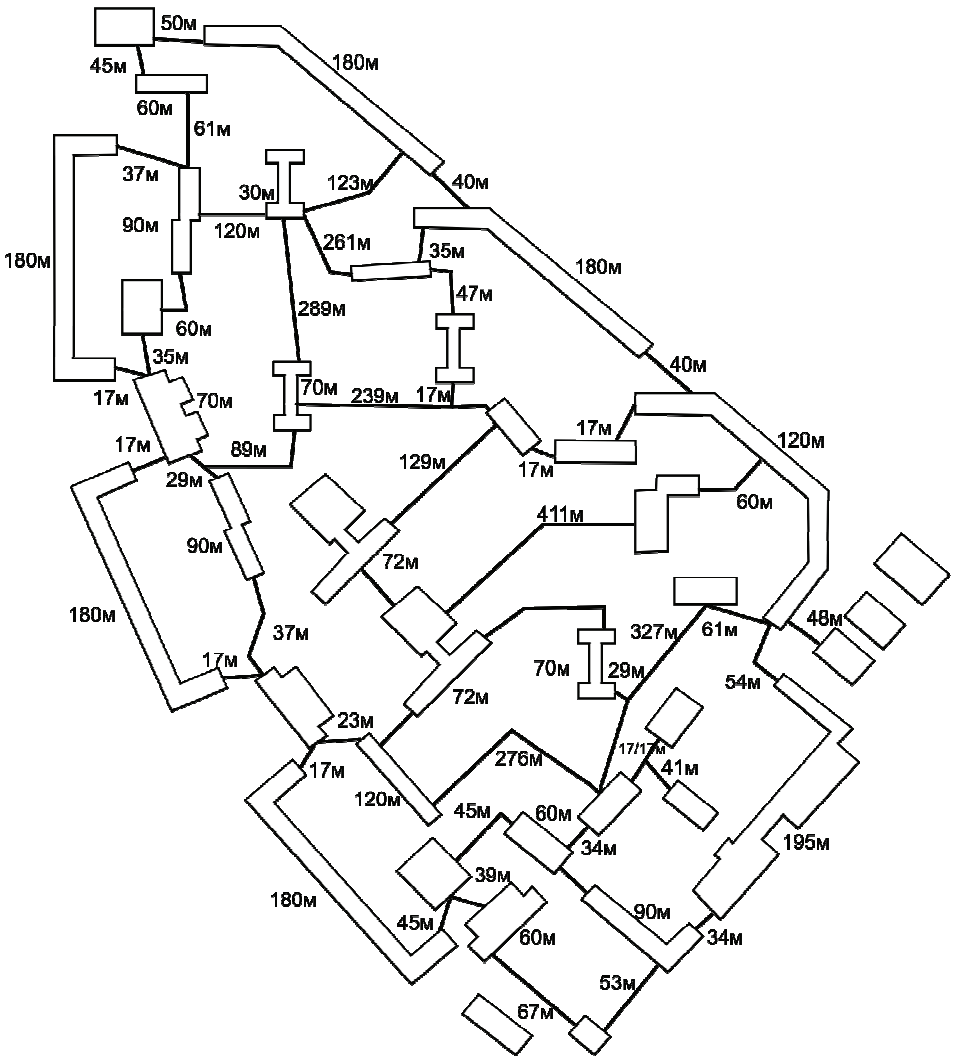


Рис. 1. Карта района города с кабельными каналами

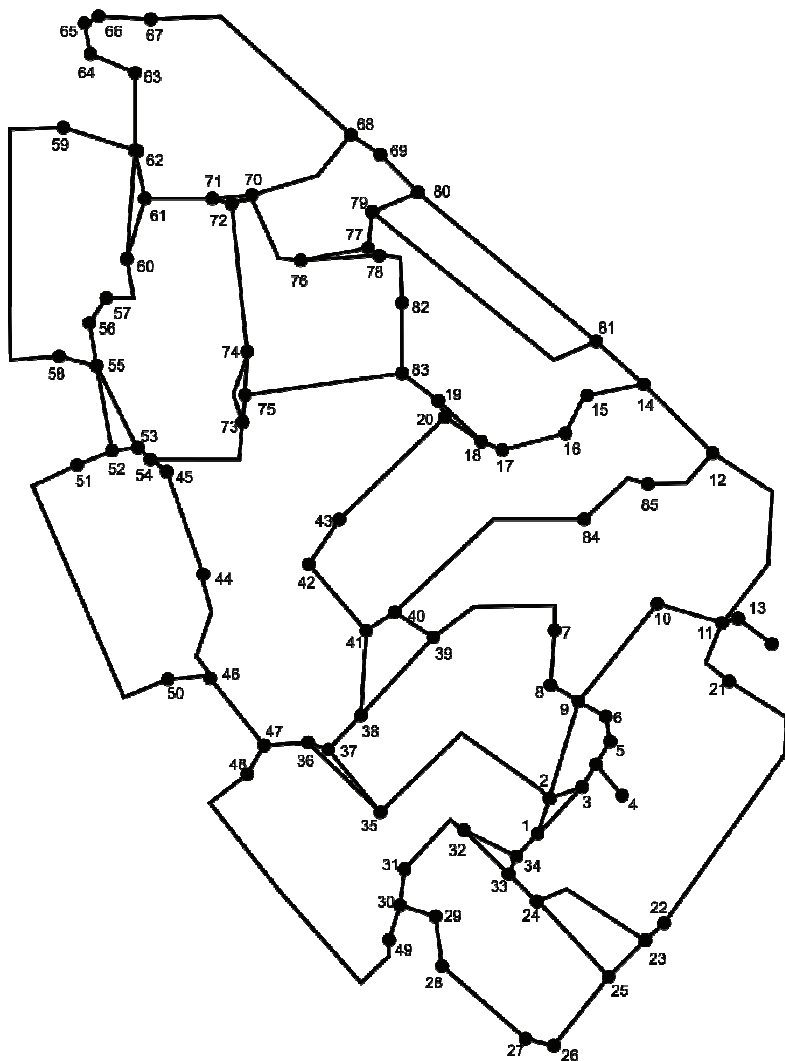


Рис. 2. Граф возможных трасс прокладки ОК

Нахождение всех близких к оптимальному трасс прокладки ОК позволяет реализовать многовариантное проектирование и, учитывая дополнительные неформализованные требования, выбрать реальный вариант проекта трассы для внедрения. В качестве дополнительных требований могут служить количество изгибов на оптимальной трассе, возможность выполнения работ на трассе, пересечение трубопроводов или дорог и т. п.

Алгоритм решения. Алгоритм решения задачи состоит из двух этапов. Определение минимального по длине трассы прокладки ОК R_{ij} сводится к решению известной задачи кратчайшего пути на графе. Для этого применяют известный алгоритм [4], основанный на расстановке пометок на вершинах графа. Для определения множества всех

близких к оптимальному трасс прокладки применяется алгоритм, основанный на методе последовательного анализа вариантов [5] и использовании правила отбраковки бесперспективных вариантов до получения окончательного решения.

Как известно, в алгоритме Дейкстры для поиска кратчайшего пути вершинам графа приписывают временные или постоянные пометки. Они определяют для вершины верхнюю границу длины пути от i вершины до текущей. Величины временных пометок вершин постепенно уменьшаются. Значение пометки определяет возможную длину пути от начальной до этой вершины. На каждом шаге алгоритма только одна из пометок с минимальным значением на рассматриваемом уровне выбирается в качестве постоянной. Другими словами, значение пометки является длиной кратчайшей трассы из i вершины в текущую вершину.

Введем следующие обозначения: $V(s)$ — множество ребер, входящих или выходящих из вершины s ($V(s) \subseteq W$); $|V(s)|$ — мощность множества; p_{sj} — пометки вершины $s \in A$, $j = 0, 2, \dots, |V(s)|-1$; B — множество вершин с постоянными пометками для $j = 0$.

Алгоритм первого этапа поиска оптимальной трассы прокладки ОК состоит из шести шагов.

Шаг 1. Присвоить пометке начальной вершины $p_{i0} = 0$ и считать постоянной. Для всех остальных вершин $s \in A/\{i\}$ установить $p_{s0} = \infty$ и считать эти пометки временными. Установить $d = i$; $B = \{i\}$. Обновить метки.

Шаг 2. Для всех вершин $s \in V(d)$ вычисляются новые значения

$$p_{sj} = p_{dj} + t_{ds}, j = 0, 2, \dots, |V(s)|-1. \quad (1)$$

Таким образом, для каждой вершины будет определена длина трассы прокладки для всех возможных трасс от исходной вершины i до вершины s .

Для $j = 0$ временные пометки вычисляют, используя выражение

$$p_{s0} = \min \left[p_{s0}, (p_{d0} + t_{ds}) \right], \quad (2)$$

и превращают эти пометки в постоянные.

Шаг 3. Среди всех вершин с временными пометками $s \in A/B$ найти такую вершину k , для которой значение пометки минимально $p_{k0} = \min p_{s0}$.

Шаг 4. Считать пометку p_{k0} постоянной и установить $d = k$. В множество B добавить вершину k .

Шаг 5. Если $d \neq j$, то перейти к шагу 2. Если $d = j$, то p_{k0} является длиной оптимальной трассы R_{ij} из вершины i в вершину j .

Шаг 6. Если все пометки всех вершин постоянные, т. е. $B = A$, то на этом определении оптимальной трассы кабеля завершается.

После этого происходит восстановление трассы прокладки кабеля.

На втором этапе алгоритма задается допустимое значение отклонения от оптимального значения E . На первом этапе, в отличие от алгоритма Дейкстры, для каждой вершины в зависимости от мощности множества $V(s)$ вычисляются по формуле (1) и запоминается не одно, а ряд значений пометок. Затем для каждой вершины отбрасываются те значения пометок, для которых выполняется соотношение

$$p_{sj} > (p_{k0} + E), s \in V(d), j = 0, 2, \dots, |V(s)| - 1. \quad (3)$$

В случае дальнейшего получения вариантов трасс прокладки из таких значений пометок их значения будут только возрастать.

Такой подход успешно применяется для поиска оптимального по длине и близких к нему маршрутов проезда на дорожной сети большой протяженности [6].

Программная реализация алгоритма. Алгоритм решения задачи реализован в виде клиент-серверного приложения с использованием программного интерфейса электронной карты Google Maps [7]. В качестве сервера используется web-сервер Apache с предустановленным языком PHP 5-й версии. Клиентская часть реализована на HTML5 с применением языка JavaScript. Обработка запросов на поиск решения осуществляется на сервере. Для хранения данных графа и полученных трасс используется база данных.

Работа с web-приложением происходит через систему меню с использованием мыши. После загрузки электронной карты с помощью указателя мыши назначаются вершины графа возможных трасс прокладки. Затем указываются соединения вершин графа между собой для кабельной канализации и соответствующие длины участков. На карте помечаются начальная и конечная вершины для прокладки оптического кабеля. Имеется возможность оперативного изменения характеристик вершин и ребер графа на электронной карте.

В программе реализованы два алгоритма — Дейкстры и нахождения всех E , близких к минимальной по длине трасс прокладки кабеля.

Полученные минимальная по длине и все близкие к ней варианты трасс прокладки ОК между двумя вершинами графа выделяются на карте различными цветами.

С помощью разработанной программы проведены расчеты для района города с 85 вершинами и 123 ребрами. Для поиска близких к минимальной трассе решений между точками 1 и 25 параметр E задавался равным 50 м. На рис. 3 приведен пример представления результатов поиска трасс кабеля между двумя точками для заданного района. Для этих точек получены трасса прокладки кабеля минимальной

длины 3570 м и две близкие к ней трассы с длинами 3600 и 3620 м. Проведенные расчеты показывают, что изложенный подход позволяет увеличить количество просматриваемых возможных вариантов проектных решений по прокладке оптического кабеля и снизить стоимость его прокладки на стадии проектирования.

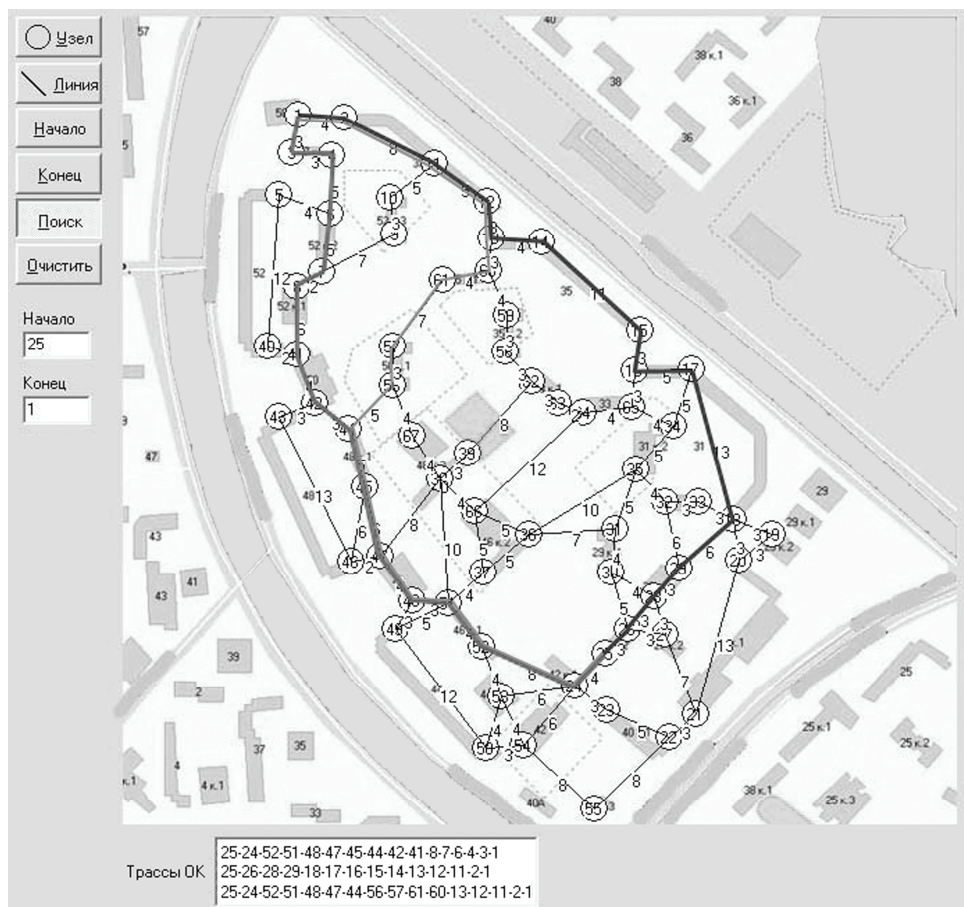


Рис. 3. Результаты выбора трассы прокладки оптического кабеля

Выводы. Предложена математическая модель задачи выбора оптимальной и всех близких к ней трасс прокладки ОК в виде задачи теории графов. Для ее решения применяют модифицированный алгоритм Дейкстры. Определение всех решений, близких к оптимальному, позволяет при окончательном выборе трассы оптического кабеля учесть дополнительные, не формализованные в условиях задачи требования.

Алгоритм решения этой задачи реализован в виде web-приложения с использованием электронной карты. Применение программы позволяет увеличить количество просматриваемых вариантов проектных

решений и за счет этого улучшить качество выбора трасс прокладки оптического кабеля и снизить ее стоимость на стадии проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Портнов Э.Л. *Оптические кабели связи*. Москва, Горячая линия — Телеком, 2002, 232 с.
- [2] *Ведомственные строительные нормы. Инструкция по проектированию линейно-кабельных сооружений связи. ВСН 116-93*. Москва, Гипросвязь, 1993, 57 с.
- [3] Степанов П.В. Математическое моделирование трассировки волоконно-оптической линии связи. *Сб. науч. трудов 6-й Молодежной научно-техн. конф. Научные технологии и интеллектуальные системы*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, с. 37–40.
- [4] Кристофидес Н. *Теория графов. Алгоритмический подход*. Москва, Мир, 1978, 432 с.
- [5] Моисеев Н.Н. *Численные методы в теории оптимальных систем*. Москва, Наука, 1971, 424 с.
- [6] Степанов В.П. О математическом моделировании дорожной сети. *Новые информац. технологии в автоматизир. системах: Мат. 13-го научно-практического семинара*. Москва, МИЭМ, 2010, с. 237–243.
- [7] *Программный интерфейс электронной карты Google Maps*. URL: <http://developers.google.com>

Статья поступила в редакцию 10.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Степанов В.П., Степанов П.В. Об оптимизации трассы прокладки оптического кабеля. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/775.html>

Степанов Валерий Павлович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 85 научных трудов в области проектирования автономных электрических сетей, информационных технологий. e-mail: vapals@yandex.ru

Степанов Павел Валериевич окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. по специальности «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры». Автор 5 научных работ в области проектирования информационных сетей связи. e-mail: vapals@yandex.ru