

На правах рукописи



Токтошов Гулжигит Ысакович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ
ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ**

05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования “Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики” (ФГОБУ ВПО “СибГУТИ”).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Попков Владимир Константинович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Малашенко Юрий Евгеньевич

кандидат физико-математических наук,
Мигов Денис Александрович

Ведущая организация: ФГОБУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций» имени проф. М. А. Бонч-Бруевича

Защита состоится 27.12.2011 г. в 16-30 часов на заседании диссертационного совета Д 003.061.02 при Учреждении Российской академии наук Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (ИВМиМГ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика М. А. Лаврентьева, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Автореферат разослан 23 ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.061.02
доктор физико-математических наук



С. Б.Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время наблюдается возрастание потребности современного общества в услугах инженерных сетей всех видов. Стремительно увеличиваются объемы продукции, потребляемой в промышленности, сельском хозяйстве и коммунально-бытовом обслуживании населения. В связи с этим возрастает актуальность эффективного проектирования линейных сооружений различного назначения, таких как газо-, нефте-, и водопроводы, теплосети, автомобильные и железные дороги, линии электросвязи и электропередач и т. д., обеспечивающего минимальную стоимость строительно-монтажных работ и эксплуатации.

В настоящее время вопросами оптимизации сетей занимаются как зарубежные, так и отечественные ученые. Существуют различные методы решения поставленной задачи, однако известные методы практически не учитывают взаимодействие подсистем «линейные сооружения – область размещения», что не позволяет обосновать экономическую целесообразность и техническую возможность построения сети в соответствующем месте. Вообще говоря, единого подхода к проектированию сетей, позволяющего выбрать оптимальное решение в условиях взаимодействия линейных сооружений и окружающей среды, не существует. Это, в свою очередь, не позволяет провести качественную оценку параметров проектируемой сети и приводит к выбору необоснованного решения.

Это связано с тем, что линейные сооружения, размещенные на заданной территории, становятся техногенным элементом природной среды, сформированной горными породами и оборудованием, а также техногенной геоморфологической структурой, отвечающей определенным нормативным требованиям к параметрам сетей. Поэтому учет воздействия на линейные сооружения природных и ситуационных факторов является одним из основополагающих принципов, оказывающих влияние на выбор проектных решений.

В связи с этим **целью настоящей работы** является разработка эффективного подхода размещения линейных сооружений на заданной территории, обладающего следующими особенностями:

- учет природных и ситуационных условий заданной территории;
- рассмотрение подсистем «линейные сооружения – область размещения» как единого объекта исследования;
- выбор оптимального решения в условиях взаимодействия линейных сооружений и окружающей среды;
- проведение оценки стоимости проектируемой сети до начала строительных работ;
- применимость к проектированию сетей различного назначения.

Поставленная цель достигается в результате:

- создания концептуальной основы анализа и синтеза систем сетевой структуры различного назначения;
- исследования существующих моделей и методов оптимизации сетей;
- исследования природных и ситуационных условий области размещения;
- разработки информационных и математических моделей местности;
- моделирования взаимодействия подсистем «линейные сооружения – область размещения»;
- разработки нового подхода к проектированию сетей, позволяющего выбрать решение в условиях взаимодействия линейных сооружений и окружающей среды;

- разработки более эффективного метода размещения линейных сооружений на заданной территории;
- проведения численного эксперимента и сравнения результатов, полученных с помощью разработанного алгоритма, с ранее известными методами.

Методы исследования базируются на методе сеток, теории графов, исследовании операций, дискретной оптимизации, методах имитационного моделирования, методах теории гиперсетей.

Основные положения, выносимые на защиту:

- концептуальная модель для анализа и синтеза инженерных сетей различного назначения;
- двумерная и трехмерная цифровые модели области размещения;
- гиперсетевая технология оптимизации инженерных сетей;
- двухэтапный алгоритм размещения линейных сооружений на заданной территории.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- предложена новая методика моделирования инженерных сетей с помощью гиперсетей, позволяющая рассматривать подсистем «линейные сооружения – область размещения» как один объект исследования;
- разработаны двумерная и трехмерная цифровые модели области размещения, учитывающие зависимость трасс линейных сооружений от рельефа местности;
- предложена гиперсетевая технология оптимизации инженерных сетей, обеспечивающая выбор решения в условиях взаимодействия проектируемой сети с окружающей средой;
- разработан алгоритм, позволяющий эффективно по минимуму приведенных затрат разместить проектируемую сеть на заданной территории;
- разработана программа для проведения численных экспериментов.

Практическая ценность работы заключается в разработке методики, алгоритма и программы, позволяющих выбрать оптимальное решение в условиях взаимодействия линейных сооружений и окружающей среды. Полученные в работе теоретические результаты могут быть использованы в проектных организациях при анализе и синтезе проектных решений для различных линейных сооружений, что позволит сократить сроки и уменьшить трудоемкость проектирования.

Личный вклад соискателя заключается в разработке гиперсетевого подхода к проектированию сетей, разработке приближенного алгоритма эффективного размещения проектируемой сети на заданной территории, создании программ для численного эксперимента, проведении тестовых расчетов. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Апробация работы

Основные научные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- (3-я – 6-я) Международные Азиатские школы-семинары "Проблемы оптимизации сложных систем" (Киргизия, Казахстан, Россия, 2007–2010 гг.);

- IX Всероссийская конференция молодых ученых "Математическое моделирование и информационные технологии" (г. Кемерово, КемГУ, 28–30 окт. 2008 г.);
- Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (г. Новосибирск, НГТУ, 4–7 декабря 2008 г.);
- Российских научно-технических конференциях "Информатика и проблемы телекоммуникаций" (г. Новосибирск, СибГУТИ, 2008–2011 гг.);
- Региональная научно-практическая конференция "Молодежь и научно-технический прогресс" (г. Владивосток, ДВГТУ, апрель–май 2009 г.);
- Международная научно-практическая конференция "Электроэнергетика в сельском хозяйстве" (Республика Алтай, с.Чемал, 26–30 июня 2009 г.);
- IV Всероссийская конференция "Проблемы оптимизации и экономические приложения" (г. Омск, 29 июня – 4 июля 2009 г.);
- Всероссийская конференция "Математическое моделирование и вычислительно-информационные технологии в междисциплинарных научных исследованиях" (г.Иркутск, 15–17 июня 2011г.).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 работах, список которых приведен в конце автореферата, среди них 2 работы опубликованы в периодических изданиях из списка ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы - 200 страниц. Основной текст диссертации изложен на 180 страницах, включает библиографический список из 129 наименований работ и 30 рисунков. Рисунки, формулы и библиографические ссылки имеют сквозную нумерацию по всей работе.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены ее цели и задачи исследований, приведена структура и краткое изложение работы по каждой главе.

В первой главе исследованы системы сетевой структуры на примере инженерных сетей. Приведены классификация, основные свойства и назначения инженерных сетей. Изучен жизненный цикл инженерных сетей, отражающий их развитие во времени.

Исследованы виды и назначения линейных сооружений, как одной из самых важных и дорогостоящих подсистем любой системы сетевой структуры, обеспечивающих транспортировку целевой продукции от источника к потребителям. Приведены факторы, влияющие на выбор трассы для прокладки линейных сооружений.

Далее исследованы прикладные задачи, возникающие при управлении эксплуатацией инженерных сетей.

Вторая глава посвящена методологическим вопросам исследования и оптимизации сетей различного назначения. Предложены различные типы теоретических моделей инженерных сетей, с помощью которых прогнозируются характеристики и оцениваются возможности проектируемой сети. Исследованы основные типы гиперсетей как универсальной модели, описывающей взаимодействие подсистем «линейные сооружения – область размещения» как единый объект исследования.

Определение 1. Гиперсеть $S = (X, V, R; P, F, W)$ – это математическая модель структуры инженерных сетей, включающая (рис. 1):

- $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – множество вершин;
- $V = (v_1, v_2, \dots, v_g)$ – множество ветвей;
- $R = (r_1, r_2, \dots, r_m)$ – множество ребер;
- $P: V \rightarrow 2^X$ – отображение, сопоставляющее каждому элементу $v \in V$ множество $P(v) \subseteq X$ его вершин, тем самым, отображение P определяет граф $PS = (X, V; P)$;

- $F: R \rightarrow 2^V_{PS}$ – отображение, сопоставляющее каждому элементу $r \in R$ множество ветвей $F(r)$, образующих простой маршрут в графе $PS = (X, V; P)$, причем семейство подмножеств ветвей 2^V_{PS} содержит такие подмножества, ветви которых составляют связную часть графа PS . Отображение F определяет гиперграф $FS = (V, R; F)$;

- $\forall r \in R \ W: r \rightarrow 2^{P(F(r))}$ – отображение, сопоставляющее каждому элементу $r \in R$ подмножество его вершин $W(r) \subseteq P(F(r))$, где $P(F(r))$ – множество вершин в PS , инцидентных ветвям $F(r) \subseteq V$. Отображение W определяет граф $WS = (X, R; W)$. Таким образом, гиперграф PS – первичная сеть, а гиперграф WS – вторичная сеть.

Из определения гиперсети следует, что математическая модель области размещения соответствует первичной сети $PS = (X, V; P)$ (рис. 1,а) гиперсети S , а конфигурация инженерной сети – вторичной сети $WS = (X, R; W)$ (рис. 1,б). Взаимодействие этих сетей определяется гиперсетью S (рис. 1,в), т. е. ветвь $v \in V$ инцидентна ребру $r \in R$ тогда и только тогда, когда соответствующее ребро r вторичной сети реализовано по ветви v соответствующей трассы $F(r)$.

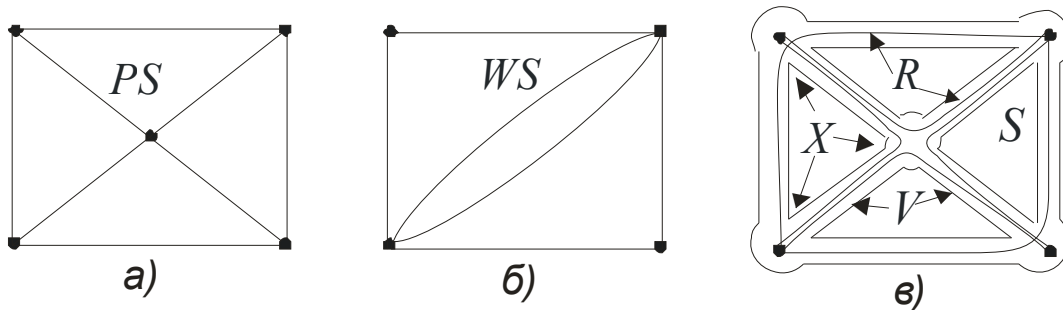


Рис. 1. Пример простой гиперсети

Приведена методика построения инженерных сетей на основе разработки эффективных методов анализа и синтеза структуры сетей, оценки их параметров и создания соответствующих методик и рекомендаций на базе полученных результатов. Исследованы основные критерии эффективности функционирования сетей, с помощью которых оценивается качество, вычисляются те или иные параметры проектируемой сети.

Исследованы некоторые задачи анализа и синтеза инженерных сетей и сформулированы содержательная и формальная постановка задачи оптимизации сетей. Проведен сравнительный анализ методов решения задач оптимизации сетей, выделены границы их применимости, описаны некоторые типы методов, применимых к анализу и синтезу сетей, представленных гиперсетями.

Третья глава посвящена информационному и математическому обеспечению проектирования сетей в горной местности со сложным рельефом и высокой степенью неоднородности природных и ситуационных условий. Приведено подробное

описание горной территории, ее природные и ситуационные условия, предопределяющие экономическую целесообразность и техническую возможность построения сети в соответствующем месте.

Исследованы инженерно-экономическая и информационная модели местности, содержащие полную первичную и вторичную информацию о местности, что позволяет:

- установить рациональное положение трассы линейных сооружений и ее объектов относительно окружающей среды;
- получить оптимальные условия эксплуатации сетей;
- разработать рациональные параметры элементов сети;
- определить объемы строительных работ и стоимость строительства сети и т. д.

Представлена модель интегрированной информационной среды, которая служит информационной основой построения вторичных моделей местности.

Подробно исследован метод сеточной аппроксимации элементов топоосновы, суть которого заключается в построении сетки соответствующей конфигурации и нахождении отображения численных характеристик природных и ситуационных условий (высотные отметки, расстояние, стоимость строительных работ и т. д.) в соответствующие элементы, которые переводят область размещения в расчетную сетку. Расчетная сетка, которая является вторичной по отношению к исходным данным, должна максимально точно отражать природные и ситуационные условия области размещения. В основу построения расчетных сеток использованы регулярные сетки (прямоугольная сетка с диагоналями и без диагоналей), поскольку на практике равносильно используются как регулярные, так и нерегулярные типы сеток.

Для линейных сооружений, не имеющих ограничений параметров трассы в профиле, удобно использовать двумерную сетку на плоскости. Суть построения двумерной расчетной сетки заключается в выборе применяемого типа сетки, и ее наложении на область размещения с присвоением в ветвях численных характеристик природных и ситуационных условий заданной территории (рис.2,а-г).

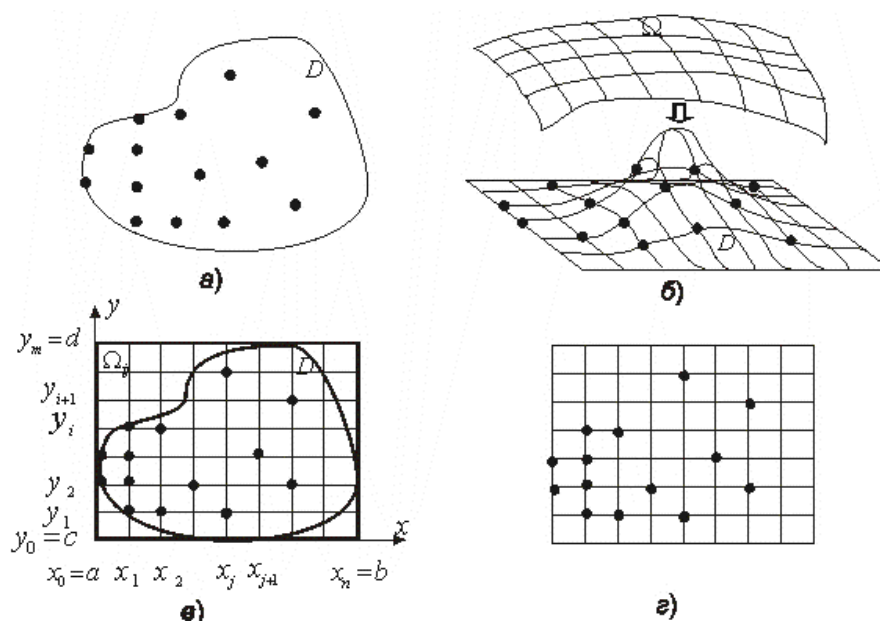


Рис. 2. Построение двумерной расчетной сетки

Пусть Ω – сетка, наложенная на область размещения D . Всякая ветвь, соединяющая некоторые пары узлов x_{ji} и $x_{j+k,i+r}$ характеризуется длиной ρ и стоимостью Q .

Длина ветви $(x_{ji}, x_{j+k,i+r})$ для двумерной расчетной сетки определяется следующим образом:

- $\rho(x_{ji}, x_{j+k,i+r}) = |x_{j+k} - x_j| + |y_{i+r} - y_i|$ для прямоугольной сетки без диагоналей;
- $\rho(x_{ji}, x_{j+k,i+r}) = \sqrt{(x_{j+k} - x_j)^2 + (y_{i+r} - y_i)^2}$ для прямоугольной сетки с диагоналями.

Нетрудно заметить, что величина $\rho(x_{ji}, x_{j+k,i+r})$ удовлетворяет аксиоме метрического пространства, т. е. для всех i, j и k, r ($j \neq k, i \neq r$):

- 1) $\rho(x_{ji}, x_{j+k,i+r}) \geq 0 \Rightarrow \rho(x_{ji}, x_{j+k,i+r}) = 0$, если $x_{ji} = x_{j+k,i+r}$;
- 2) $\rho(x_{ji}, x_{j+k,i+r}) = \rho(x_{j+k,i+r}, x_{ji})$;
- 3) $\rho(x_{j-1,i-1}, x_{j+k,i+r}) \leq \rho(x_{j-1,i-1}, x_{ji}) + \rho(x_{ji}, x_{j+k,i+r})$.

Для линейных сооружений, продольный профиль которых зависит от высотных характеристик области размещения, для каждого узла сетки Ω , кроме метрических характеристик ветвей, аналитически или в виде таблицы задается минимальный перепад высот h моделируемой поверхности. Далее сетка Ω переносится снизу вверх параллельно по оси Oz таким образом, чтобы она касалась всеми точками поля высот $h = f(x, y)$, в результате чего получается трехмерная сетка (рис. 3,а-г).

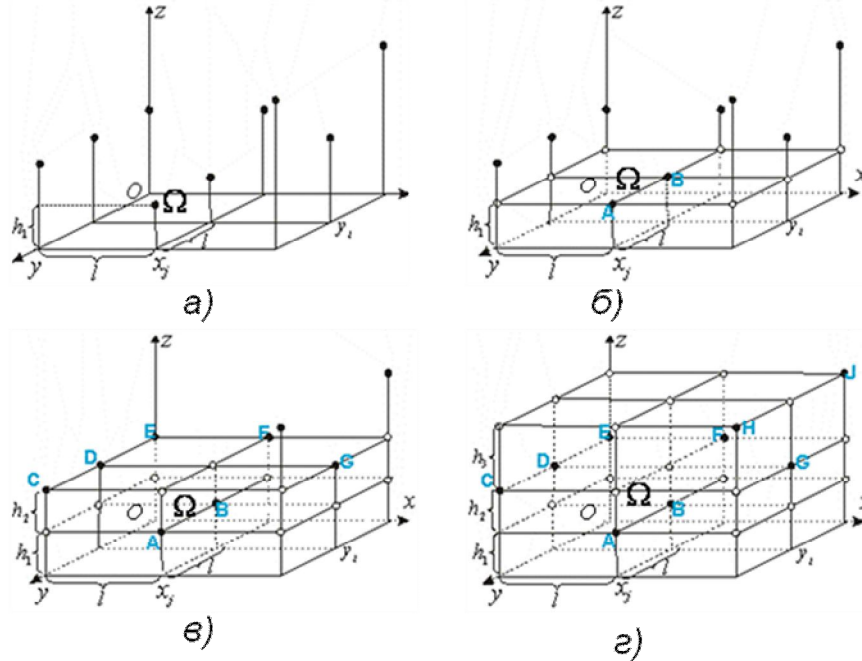


Рис. 3. Построение трехмерной расчетной сетки

Далее приведены примеры вычисления длин ветвей $(x_{ji}, x_{j+k,i+r})$, соединяющих некоторые пары узлов трехмерной расчетной сетки. Причем (рис. 3,г):

- $\rho(A, B) = l$, если вершины A и B соседних клеток располагаются на одном уровне;
- $\rho(A, C) = \sqrt{l^2 + h_2^2}$, если вершины A и C соседних клеток располагаются на разных уровнях;
- $\rho(B, J) = \sqrt{2l^2 + (h_2 + h_3)^2}$, если вершины B и J соседних клеток располагаются на разных уровнях (диагональ с двумя ступенями);
- $\rho(D, F) = l\sqrt{2}$, если вершины D и F соседних клеток располагаются на одном уровне (диагональ);

– $\rho(A, G) = \sqrt{2l^2 + h_2^2}$, если вершины A и G соседних клеток располагаются на разных уровнях (диагональ с одной ступенью).

В работе для определения направления трассы для прокладки линейных сооружений введены величины α – угол между отрезком, соединяющим некоторые пары узлов (не фиктивных), и горизонтальной поверхностью; α_{up} – предельно допустимый угол прокладывания линии вверх по склону; α_{down} ($\alpha_{down} < 0$) – предельно допустимый угол прокладывания линии вниз по склону; α_{side} – предельно допустимый угол прокладывания линии перпендикулярно по склону.

Выделены возможные случаи:

1. Если $\alpha \leq \alpha_{up}$, то прокладка линии вверх по склону разрешена, в противном случае – нет;
2. Если $\alpha \geq \alpha_{down}$, то прокладка линии вниз по склону разрешена, в противном случае – нет;
3. Если $\alpha \leq |\alpha_{side}|$, то прокладка линии перпендикулярно склону разрешена, в противном случае – нет. Ясно, что $\{\alpha_{up}, \alpha_{down}, \alpha_{down}\} < 90^\circ$.

Введены правила определения направления ветви:

- если для некоторой пары узлов трехмерной сетки Ω , расположенных на разных уровнях, выполняется условие 1 (условие 2), то ветвь ориентирована снизу вверх (сверху вниз);
- если для некоторой пары узлов трехмерной сетки Ω , расположенных на одном уровне, выполняется условие 3, то между соответствующими узлами существует неориентированная ветвь, в противном случае ветви не существует.

Показана сводимость трехмерной расчетной сетки к некоторому ориентированному графу, взвешенному соответствующим образом (рис. 4).

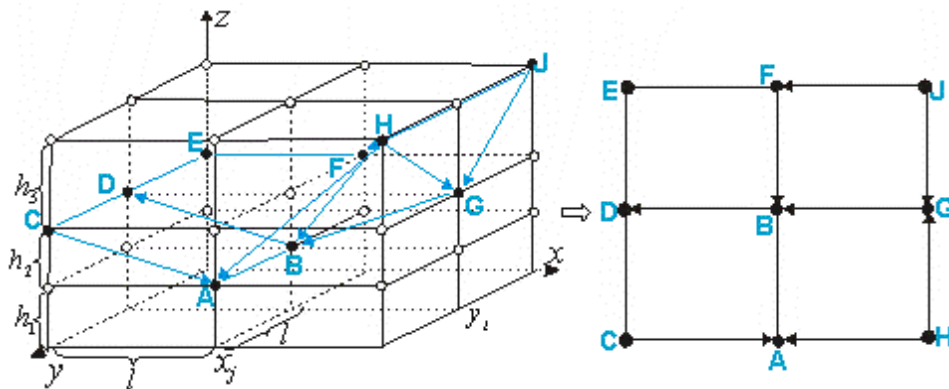


Рис. 4. Построение ориентированного графа

Каждой ветви расчетных сеток Ω присвоим вес, равный

$$Q(x_{ji}, x_{j+k, i+r}) = a(x_{ji}, x_{j+k, i+r}) \cdot \rho(x_{ji}, x_{j+k, i+r}) \quad (1)$$

где $x_{ji} = (x_j, y_i)$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) – координаты точек пересечения ветвей $(x_{ji}, x_{j+k, i+r}) \in \Omega$; $a(x_{ji}, x_{j+k, i+r})$ – стоимость строительных работ на единицу длины ветви.

Очевидно, что суммарная стоимость строительных работ во всей сеточной области принимает следующий вид:

$$Q(\Omega) = \sum_{\Omega} a(x_{ji}, x_{j+k, i+r}) \cdot \rho(x_{ji}, x_{j+k, i+r}) \quad (2)$$

Определение 2. Область D на плоскости xOy называется однородной территорией, если $\forall x_{ji}, x_{j+k,i+r} \in \Omega: a(x_{ji}, x_{j+k,i+r}) = const$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; j \neq k, i \neq r$). В противном случае область D называется неоднородной.

Ясно, что в горной местности удельные строительные затраты различны в различных точках области D , т. е. значение функции $Q(x_{ji}, x_{j+k,i+r})$ зависит от координат точек $x_{ji}, x_{j+k,i+r} \in D$. В этом смысле область D можно считать неоднородной.

Для моделирования неоднородность заданной территории применена следующая технология: область D , в соответствии с выбранными критериями, разбивается на элементарных участков D_1, \dots, D_τ с примерно одинаковыми природными и ситуационными условиями, и внутри каждого элементарного участка D_l ($l = 1, \dots, \tau$ количество элементарных участков) строится расчетные сетки Ω_l ($l = 1, \dots, \tau$).

Очевидно, что вся сеточная область $\Omega = \bigcup_{l=1}^{\tau} \Omega_l$.

Суммарная стоимость строительных работ во всей сеточной области для неоднородного случая имеет вид:

$$Q(\Omega) = \sum_{l=1}^{\tau} \left(\sum_{\Omega_l} a(x_{ji}^l, x_{j+k,i+r}^l) \cdot \rho(x_{ji}^l, x_{j+k,i+r}^l) \right) \quad (3)$$

(τ – количество элементарных участков, на которые разделена вся область, $(x_{ji}^l, x_{j+k,i+r}^l) \in Q$).

Предложенные в диссертации расчетные сетки (двумерная, трехмерная) могут служить математическими моделями местности для вычисления стоимости строительных работ для прокладки линий, в которых отображены численные характеристики природных и ситуационных условий области размещения и рельефа местности в соответствии с (1). Расчетные сетки позволяют решить задачу поиска трасс для прокладки линейных сооружений в следующей постановке: найти маршруты между заданными парами узлов на сетке Ω , для которых функции (2) или (3) принимают минимальные значения. Расчетная сетка Ω в целом определяет некоторое метрическое пространство заданной размерности.

В **четвертой главе** приведено теоретическое описание процесса разработки гиперсетового подхода. Суть предлагаемого в диссертации подхода заключается в том, что в основу проектирования сетей закладывается сеточное метрическое пространство Ω , в котором последовательно размещаются структуры соответствующих подсистем, составляющих проектное решение (рис. 5).

Показано, что взаимодействие структуры подсистем определяется иерархической 3-гиперсетью $S_3 = (PG, PO, PS, WS; F_0, F_1, F_2, F_3)$ (рис. 5), в которой $PG = (X, G; F_0)$ – граф, построенный на множестве узлов X сетки Ω , а множество ребер соответствует ее ветвям; $PO = (X_1 \subseteq X, U; F_1)$ – граф ситуационных трасс, в котором $X_1 \subseteq X$ – множество узловых основы заданной территории (места возможного размещения узловых элементов), а U – всевозможные трассы для линейных сооружений; $PS = (X_2 \subseteq X_1, V; F_2)$ – граф для линейных сооружений (ЛС), в котором множество вершин $X_2 \subseteq X_1$ соответствует местам непосредственного размещения узловых элементов сети, а ребра V – линейным сооружениям; $WS = (X_3 \subseteq X_2, R; F_3)$ – граф вторичных сетей, в котором $X_3 \subseteq X_2$ – множество узлов, а R – множество ребер вторичной сети. Приведена постановка задачи оптимизации

сетей, суть которой – построение иерархической 3-гиперсети S_3 минимальной стоимости.

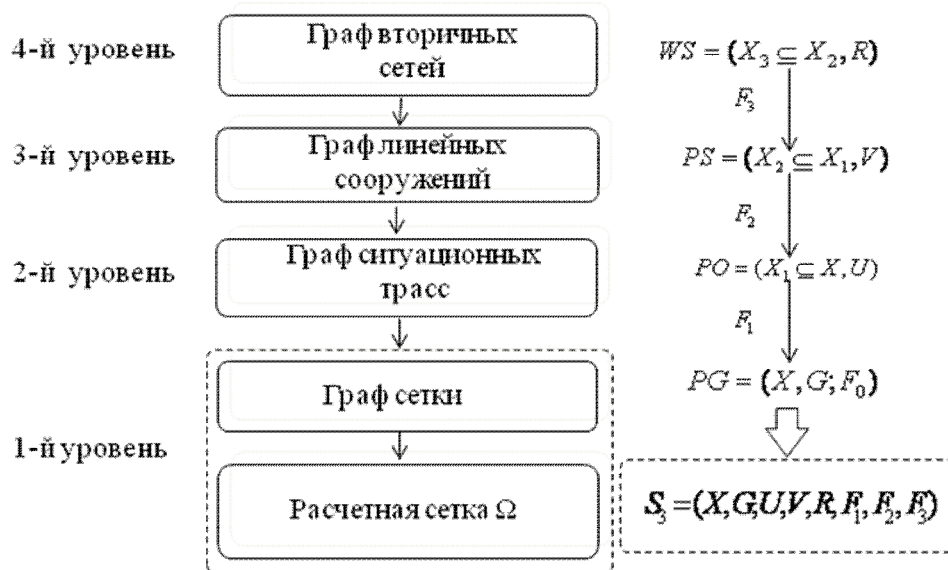


Рис. 5. Гиперсетевой подход к проектированию сетей

Приведено описание методики оптимизации сетей на основе предложенной технологии и исследованы задачи оптимизации сетей на примере сетей электропередачи и электросвязи.

Для проведения численных экспериментов в диссертации решено использовать гиперсеть $S = (PS, WS; F)$. Такой выбор основан на том, что гиперсети $S = (PS, WS; F)$ в настоящее время наиболее изучены и при синтезе оптимальных структур сетей дают наиболее приемлемые результаты. Далее приведена обобщенная постановка задачи оптимизации сетей как задачи оптимального вложения вторичной сети WS гиперсети S в первичную сеть PS .

Постановка задачи. Пусть известны графы $PS = (X, V)$ и $WS = (Y, R)$ и параметры их элементов: $\rho(v)$ – длина ветви $v \in V$ графа PS ; $\rho(r)$ – длина ребра $r \in R$ графа WS , равная $\rho(r) = \sum_{v \in F(r)} \rho(v)$; $a(v)$ – удельная стоимость строительных (земляных) работ на ветвях $v \in V$; $b_r(v)$ – удельная стоимость аренды ресурсов для ветви $v \in V$; $c(r)$ – стоимость приобретения и монтажа линий $r \in R$ для прокладки ветви между парой заданных точек $d_v(r)$ – стоимость эксплуатационных работ.

Задача заключается в реализации ребра графа WS (прокладке линий или коммуникаций) по соответствующим маршрутам (трассам) в графе PS таким образом, чтобы функционал

$$Q(S) = \left(\sum_{v \in V} \gamma_1 \cdot a(v) + \sum_{v \in V} b_r(v) \right) \cdot \rho(v) + \left(\sum_{r \in R} \gamma_2 \cdot c(r) + \sum_{r \in R} d_v(r) \right) \cdot \rho(r)$$

принимал минимальное значение, где: γ_1 и γ_2 – коэффициенты дисконтирования для стоимостей строительных работ и оборудования соответственно. Коэффициент дисконтирования – это коэффициент для приведения экономических показателей разных лет к сопоставимым по времени величинам.

Предложен двухуровневый алгоритм решения поставленной задачи, основная идея которого заключается в поиске начального решения и его улучшения. Начальное решение может быть найдено с помощью известного алгоритма Флойда или «жадного» алгоритма. Суть «жадного» алгоритма в данном случае состоит в следующем: найти все кратчайшие маршруты в графе PS с помощью алгоритма Флойда; реализовать самое дешевое (только один) ребро $r \in R$ графа WS в PS ; обновить стоимости ветвей графа PS для ребра $R \setminus r$ (стоимость использованных ветвей равна нулю); повторить процесс до тех пор, пока не будут перебраны все ребра графа WS .

Показано, что в большинстве случаев решения, найденные вышеуказанными методами, могут оказаться не оптимальными, т. е. есть возможность их улучшения путем перереализации ребер $r \in R$ графа WS по новым трассам в графе PS . Причем при перереализации ребер $r \in R$ графа WS по новым трассам в графе PS должен учитываться их порядок и результаты реализаций на предыдущем этапе трассировки.

Для определения списка, по которому следует осуществлять перереализации ребер графа WS в PS , были использованы следующие понятия.

Определение 3. Если $\forall v \in V a_v(r) = const$, то граф первичной сети PS , построенный на сетке $\Omega_{од.}$ ($\Omega_{неод.}$) назовем однородным (неоднородным) и обозначим как $PS_{од.}$ ($PS_{неод.}$).

Определение 4. Гиперсеть, построенную путем вложения графа вторичной сети WS в $PS_{од.}$ ($PS_{неод.}$), назовем однородной (неоднородной) и обозначим как $S_{од.}$ ($S_{неод.}$).

Для каждого ребра $r_k \in R$ вычислим величину $\rho(r_k, r_j) = \sum_j |(V_k \cup V_j) \setminus (V_k \cap V_j)|$, $k \neq j$ которую в дальнейшем будем называть метрикой 1, где $V_k = F(r_k)$ и $V_j = F(r_j)$ – множество ветвей графа $PS_{неод.}$, по которым проходят ребра r_k и r_j соответственно. Такая метрика позволяет определить, насколько расходятся ребра $r \in R$ друг от друга при их реализации в графе $PS_{неод.}$. Далее производится улучшение начального решения путем перереализаций в графе $PS_{неод.}$, начиная с самого удаленного ребра.

Для каждого ребра $r_k \in R$ вычислим величину $\rho(r_k, r_k^{од.}) = |(V_k \cup V_k^{од.}) \setminus (V_k \cap V_k^{од.})|$, которую в дальнейшем будем называть метрикой 2, где $V_k = F(r_k)$ – множество ветвей графа $PS_{неод.}$, $V_k^{од.} = F(r_k^{од.})$ – множество ветвей графа $PS_{од.}$, по которым проходят ребра r_k и $r_k^{од.}$ соответственно. Такая метрика позволяет выяснить, насколько расходятся маршруты $V_k = F(r_k)$ и $V_k^{од.} = F(r_k^{од.})$ в графах $PS_{неод.}$ и $PS_{од.}$ для ребра r_k и $r_k^{од.}$ соответственно. Для достижения быстрой сходимости начального решения к оптимуму процесс перереализации должен начаться с того ребра, у которого самые расходящиеся маршруты.

Таким образом, для улучшения начального решения путем перереализации ребер $r \in R$ графа WS по новым трассам в обоих случаях необходимо упорядочить ребра в порядке убывания метрики, в результате чего получим список ребер $\{r_i\}, i = 1, \dots, m$.

Такое предположение исходит из следующего соображения: если начать улучшения в порядке возрастания метрики, то все ребра начинают скапливаться в сторону самых расходящихся ребер, что может привести к замедлению сходимости решений, а еще хуже – к ухудшению их.

Случайная метрика. Произвольный порядок (список) можно построить, генерируя случайные числа от 1 до m .

Далее из списка $\{r_i\}, i=1, \dots, m$ выбирается ребро $r_i \in R$ и удаляется из гиперсети S .

Определение 5. Остаточную гиперсеть $S \setminus r_i$ по отношению к выбранному ребру $r_i \in R$ назовем первичной сетью.

Для перереализации ребра $r_i \in R$ по новым трассам обновим параметры элементов первичной сети $S \setminus r_i$ в соответствии с определенными правилами. Причем, если на некотором участке выбранного маршрута первичной сети $S \setminus r_i$ уже имеется трасса, которую можно использовать для реализации очередного ребра, то ее стоимость равна 0. С правилами обновления (перерасчета) весов ветвей первичной сети $S \setminus r_i$ можно ознакомиться более подробно в диссертационной работе.

Найдем кратчайший маршрут с помощью алгоритму Дейкстры на новых стоимостях в первичной сети $S \setminus r_i$, и по нему перереализуем ребро $r_i \in R$ графа WS .

После того как будут перебраны все ребра из списка $\{r_i\}$, получим гиперсеть S^1 с оценкой $Q(S^1)$, такую что $Q(S_{неод.}) \geq Q(S^1)$. Перебор всех ребер из списка $\{r_i\}$ в порядке, определяемом метрикой, назовем итерацией. После второй итерации получим гиперсеть S^2 такую, что $Q(S_{неод.}) \geq Q(S^1) \geq Q(S^2)$ и т. д. Итерации повторяются до тех пор, пока есть возможность улучшить решения, т. е. $Q(S^j) \geq Q(S^{j-1})$, где j – номер итераций. Это объясняется тем, что через несколько итераций стоимость гиперсети S^j перестанет снижаться.

Далее в работе описана программная реализация предложенного алгоритма и приведены численные эксперименты.

Проведены расчеты стоимости прокладки вторичной сети по описанным выше алгоритмам. В качестве первичной сети использована граф-решетка (для наглядности на рис. 6 приведены результаты работы алгоритмов для решетки 5×5 вершин), стоимость единицы длины каждой ветви заданы случайными числами; длина каждой ветви выбрана равной единице. Пары вершин для ребер вторичной сети, которую нужно сгенерировать, также выбраны случайным образом. Тесты проводились для различного количества ребер.

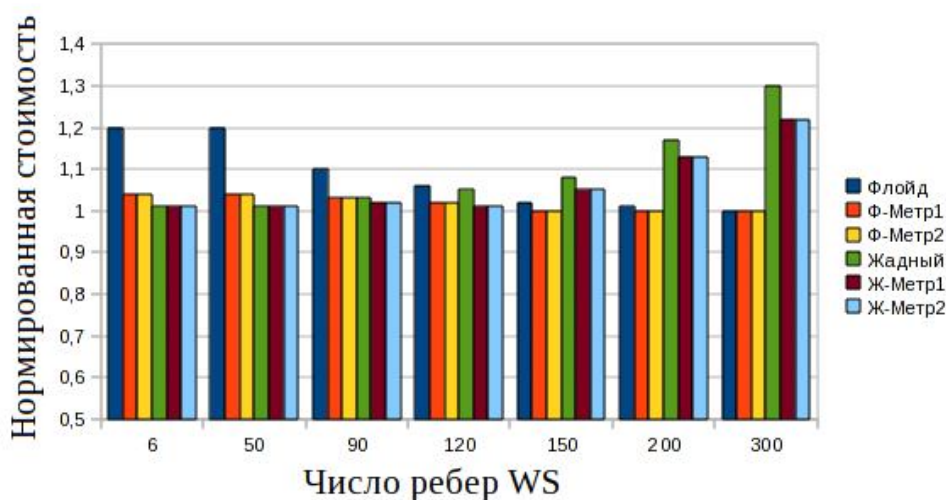


Рис. 6. Численные эксперименты

На рис. 6 по оси ординат отложена нормированная стоимость вторичной сети. Для нормирования выбиралось лучшее решение (имеющее минимальную стоимость), и веса всех решений делились на вес лучшего решения для заданного числа ребер. На оси абсцисс показано число ребер вторичной сети WS , для которого проводился расчет. Для большей наглядности проведено 10 тестов для заданных параметров, а затем нормированная стоимость усреднена.

Численные результаты, полученные на различных решетках, показывают, что наилучший результат может быть получен с помощью разных алгоритмов в зависимости от числа ребер WS : при небольшом числе ребер лучшие результаты дает «жадный» алгоритм, а при большом (больше, чем ветвей PS) – обычный алгоритм Флойда. Перелом происходит в тот момент, когда количество ребер вторичной сети примерно равно числу ветвей первичной сети ($|WS|=120$ на рис. 6).

Численные результаты показали, что использование метрик 1 и 2 дает примерно одинаковые решения, т. е. в одном случае лучшее решение может обеспечить использование метрики 1, в другом – метрики 2, причем результаты равновероятны. При усреднении нормированных решений обе метрики дают одинаковые стоимости прокладки вторичной сети.

Однако, при использовании метрики 1 необходимо чуть меньшее количество итераций, чем для метрики 2. Например, для решетки 5×5 с использованием метрики 1 решение будет получено, в среднем, за 2,5 итерации, а с использованием метрики 2 – в среднем за 3 итерации.

Таким образом, метрика 1 показывает лучший результат, однако вычислительная сложность метрики 1 выше, чем метрики 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

- на основе комплексного исследования систем сетевой структуры на примере инженерных сетей выявлены типовые задачи, которые необходимо решать в самых различных инженерных сетях, а также показаны сходные и различные черты в моделировании и описании сетей;
- выявлены основные факторы и природные условия горной местности, предопределяющие экономическую целесообразность и техническую возможность построения сети в соответствующем месте;
- предложена модель интегрированной информационной среды, являющаяся информационной основой для построения вторичных (математических, цифровых) моделей местности;
- разработаны двумерная и трехмерная (двумерная блочная и трехмерная блочная) расчетные сетки, являющиеся математической основой поиска оптимальных трасс для прокладки линий;
- показано эффективность моделирования взаимодействия подсистем «линейные сооружения – область размещения» с помощью гиперсетей, которая открывает новые возможности для исследования и проектирования сетей;
- предложен новый подход к проектированию сетей, основанный на модели гиперсетей, позволяющий учитывать взаимодействие линейных сооружений и окружающей среды, что позволяет сделать качественную оценку параметров проектируемой сети;

– предложены метрика 1 и метрика 2, обеспечивающие сходимость решений ряда задач оптимизации сетей, а также повышение точности этих решений;

– предложен двухуровневый алгоритм построения сетей, суть которого заключается в поиске начального решения и его улучшении путем последующей перетрассировки линий с учетом результата предыдущего этапа трассировки.

Список публикаций по теме диссертации

Из списка ВАК:

1. Попков В. К., **Токтошов Г. Ы.** *Гиперсетевая технология оптимизации инженерных сетей в горной или пересеченной местности* // Вестн. Бурят. гос. ун-та. – Сер. Математика и информатика. Улан-Уде: Изд-во Бурят. гос. ун-та. – Вып. 9 (июнь 2010). – С. 276 – 282.
2. Попков В. К., **Токтошов Г. Ы.** *Методологические вопросы оптимизации инженерных сетей на неоднородной территории* // Изв. Том. политехн. ун-та. – Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. –Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та. – 2010, № 5. Т. 317. – С. 40– 44.

Прочие публикации:

3. **Токтошов Г. Ы.** *О задаче оптимального проектирования инженерных сетей в горных условиях* // Материалы 2-й Азиат. Междунар. школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем», Новосибирск, 7–12 авг. 2006 г. // Труды ИВМиМГ СО РАН, Сер. Информатика. – Вып. 6. – С. 210–221.
4. **Токтошов Г. Ы.** *Математическая модель топоосновы горной местности* // Материалы 3-й Азиат. Междунар. школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем», Бишкек (Кыргызская Респ.), 1–12 июля 2007 г. // Труды ИВМиМГ СО РАН. Сер. Информатика. – Вып. 7. – С. 123–126.
5. **Токтошов Г. Ы.** *Об одной задаче анализа связности иерархических систем* // Тез. докл. 9-й Всерос. науч. конф. молодых ученых «Математическое моделирование и информационные технологии», Кемерово, 28–30 окт. 2008 г. – С. 27–28.
6. **Токтошов Г. Ы.** *Особенности выбора направлений трасс линейных сооружений в условиях высокогорья* // Материалы 4-й Азиат. Междунар. школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем», с.Чемал (Респ. Алтай), 20–30 июня 2008 г. // Труды ИВМиМГ СО РАН. Сер. Информатика. – Вып. 8 – С. 206–211.
7. **Токтошов Г. Ы.** *Задача анализа живучести иерархических сетей* // Материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, 4–7 дек. 2008 г. – Ч. 1. – С. 43–45.
8. **Токтошов Г. Ы.** *Сеточная аппроксимация элементов рельефа местности* //Материалы Всерос. науч.-технич. конф. «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, 27–28 апр. 2009 г. – Т. 1.– С.23–24.
9. **Токтошов Г. Ы.** *Сеточная аппроксимация в задаче поиска р-медианы гиперсети* // Материалы 4-й Всерос. конф. «Проблемы оптимизации и экономические приложения», Омск, 29 июня – 4 июля 2009 г. – С.167.
10. **Токтошов Г. Ы., Касобов Л. С.** *Задачи выбора оптимальных схем системы электроснабжения* // Материалы регион. науч.-практ. конф. «Молодежь и научно-технический прогресс», Владивосток, апр.–май 2009 г. – Ч. 2. – С. 50–53.

11. Попков В. К., **Токтошов Г. Ы.** *Задачи поиска оптимальных схем системы энергоснабжения методом сеточной аппроксимации* // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Электроэнергетика в сельском хозяйстве», с.Чемал (Респ/Алтай), 26–30 июня 2009 г. – Новосибирск: Изд-во Россельхозакадемия, Сиб. регион. отд., 2009. – С. 63–67.
12. Попков В. К., **Токтошов Г. Ы.** *Об одной задаче оптимального размещения элементов электрических сетей* // Инфосфера. 2009, № 42. – С. 38–40.
13. **Токтошов Г. Ы.** *Метод сеток в задачах проектирования электрических сетей* // Материалы 5-й Азиат. Междунар. школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем», Бишкек (Кыргызская Респ.), 12 – 22 авг. 2009 г. // Труды ИВМиМГ СО РАН. Сер. Информатика. – Вып. 9 – С. 132–139.
14. Попков В. К., **Токтошов Г. Ы.** *Об одной задаче синтеза сетей электросвязи в горных условиях* // Пробл. инф. 2009, № 4. – С.15–32.
15. **Токтошов Г. Ы.** *Вопросы оптимизации инженерных сетей на неоднородной территории* // Материалы Всерос. науч.-технич. конф. «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, 27–28 апр. 2010 г. – Т. 1.– С. 140.
16. **Токтошов Г.Ы.** *Гиперсетевой подход к проектированию инженерных сетей*//Материалы Российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», г.Новосибирск, СибГУТИ, 21-22 апреля 2011 г.// Том 1.– С.167-170.
17. **Токтошов Г.Ы.,** Юргенсон А.Н. *Гиперсетевой метод прокладки инженерных сетей*//Тезисы докладов Всероссийской конференции «Математическое моделирование и вычислительно-информационные технологии в междисциплинарных научных исследованиях», г.Иркутск, 15–17 июня 2011г.– С.114.

Токтошов Гулжигит Ысакович

**Исследование и разработка моделей и методов
оптимизации систем сетевой структуры
в условиях высокогорья**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 18 ноября 2011 г.
Формат бумаги 60x84/16, отпечатано на ризографе, шрифт № 10,
изд. л.1,6, заказ № 60, тираж 100 экз., ФГОБУ ВПО “СибГУТИ”.
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86.