

Челябинский политехнический институт

имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ХАВРОНИН Олег Валентинович

УДК 681.51.015:513.5

КОМПЛЕКСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
КРУПНОМАСШТАБНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ
НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИОННОГО ПОДХОДА

Специальность 01.01.11 - Системный
анализ и автоматическое управление

Автореферат
диссертации на соискание ученый
степени кандидата технических наук

Челябинск - 1988

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте
имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Цыганков В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, кандидат
физико-математических наук, старший
научный сотрудник Кондратьев В.В.,
кандидат технических наук, доцент
Ширяев В.И.

Ведущая организация - Всесоюзный научно-исследовательский
институт системных исследований АН СССР

Защита диссертации состоится "25" мая 1988 г.
в 15 час. на заседании специализированного совета К.053.13.04 в
Челябинском политехническом институте, аудитория 244 (454044,
г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " апреля 1988 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук,
профессор


А.П. Сибрин

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года, принятых XXIII съездом КПСС, отмечается "...важно добиться кардинального улучшения проектирования в строительстве". Задачи оптимального проектирования транспортных сетей возникают при строительстве продуктовых зданий различного назначения, сетей автомобильных и железных дорог, сетей электроснабжения и т.д. Условия проложения коммуникаций в различных сетях являются взаимозависимыми, так как совместное проложение коммуникаций (образование коридора коммуникаций) позволяет снизить общую стоимость сетей. Капитальные вложения при строительстве транспортных сетей системы обустройства достигают сотен миллионов рублей, и поэтому задача оптимального проектирования их является весьма актуальной. Системный подход к проектированию отдельных транспортных сетей позволяет существенно снизить общие затраты. Реальные сети имеют большую размерность, и проектирование их часто ведется в условиях неопределенности исходной информации, что может вызвать необходимость многократного решения задачи синтеза структуры сети.

Вопросы комплексного проектирования транспортных сетей разработаны в значительно меньшей степени, по сравнению с вопросами проектирования отдельных сетей. В ряде работ ставится задача определения оптимальной структуры транспортной системы, состоящей из двух взаимодействующих транспортных сетей, но без учета распределения потока по сетям. Влияние стоимости транспортировки потока по сети на структуру сети обычно существенно и не учитывать его неправомерно.

Декомпозиция системы как правило позволяет существенно повысить размерность решаемых задач, поэтому перспективным представляется использование предложенного П.С.Красноселковым, В.В.Морозовым и В.В.Федоровым декомпозиционного подхода, который заключается в выделении частных критерииев, определенным образом согласованных с исходным, решении многокритериальной задачи и последующем выборе решения из множества Парето многокритериальной задачи.

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является разработка основанной на декомпозиционном подходе методики комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей, адаптированной к реальным условиям проектирования.

Работа по тематике диссертации выполнялась в соответствии с

разделом 03.02.06 Целевой комплексной научно-технической программы О.Ц.026 "Методы автоматизированного синтеза функциональных и алгоритмических структур АСУП".

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка основанной на декомпозиционном подходе методики комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей, позволяющей управлять распределением потоков по сетям, в условиях большой размерности и неопределенности исходной информации.

В соответствии с поставленной целью основные задачи работы определены следующим образом:

1) провести анализ задачи комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей в условиях неопределенности исходной информации, проанализировать методы решения возникающих при этом задач синтеза сети и системы;

2) разработать экономико-математические модели задачи синтеза структуры транспортной сети в условиях неопределенности исходной информации и задачи синтеза структуры транспортной системы с учетом взаимного влияния сетей, входящих в систему;

3) исследовать возможность применения декомпозиционного подхода Краснощекова-Морозова-Федорова к решению задач синтеза транспортной сети и системы;

4) разработать и проанализировать алгоритмы синтеза транспортной сети и системы, основанные на декомпозиционном подходе;

5) реализовать разработанные методы синтеза транспортных сетей и систем на практике при решении задачи комплексного проектирования транспортных сетей системы обустройства нефтяного месторождения.

Методы исследования. Теория систем; системный анализ; теория графов; методы комбинаторной оптимизации; теория управления; нечеткое математическое программирование.

Научная новизна. Разработана методика комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей в условиях большой размерности и неопределенности исходной информации. При этом: введено понятие транспортной системы, как совокупности взаимодействующих транспортных сетей, расположенных в одном регионе, и разработаны экономико-математические модели задачи синтеза структуры транспортной сети в условиях неопределенности исходной информации и задачи синтеза транспортной системы с учетом взаимного влияния сетей, входящих в систему; предложены два подхода к учету неопределенности исходных данных: на основе оценки чувствительности решения к изменению исходных данных и на основе

методов нечеткого математического программирования; предложена общая схема решения задач на основе декомпозиционного подхода; на основании общей схемы разработаны приближенные алгоритмы полиномиальной трудоемкости для решения задач синтеза транспортных сетей и систем, позволяющие решать задачи в случае неопределенности исходных данных и управлять распределением потоков по сетям.

Практическая ценность. Разработанная методика комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей может быть использована при проектировании систем обустройства месторождений полезных ископаемых.

В частности, осуществлено внедрение разработки в САПР НЕФТЬ института Гипротюменнефтегаз при проектировании обустройства Пограничного месторождения, что привело к экономии затрат на строительство и обслуживание промысловых транспортных сетей за счет решения оптимизационных задач по объединению коммуникаций различного назначения, сокращению сроков проектирования, повышению производительности труда в проектном производстве. Годовой экономический эффект от внедрения разработки составляет 410 тыс. руб. Разработанное программное обеспечение принято в Специализированный и межотраслевой фонд алгоритмов и программ Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления.

Основные положения, выносимые на защиту:

Методика комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей в условиях большой размерности и неопределенности исходной информации, включающая в себя:

- экономико-математические модели задачи синтеза структуры транспортной сети в условиях неопределенности исходной информации и задачи синтеза структуры транспортной системы с учетом взаимного влияния сетей, входящих в систему;
- общую схему решения задач синтеза сети и системы, основанную на декомпозиционном подходе Краснощекова-Морозова-Федорова;
- реализующий общую схему алгоритм синтеза оптимальной структуры транспортной сети, позволяющий учитывать неопределенность исходных данных либо путем оценки чувствительности решения к изменению исходных данных, либо, на основе методов нечеткого математического программирования путем решения задачи синтеза сети с нечетким сроком эксплуатации;
- реализующий общую схему алгоритм синтеза оптимальной структуры транспортной системы с учетом взаимного влияния подсистем и распределения потоков по сетям.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях ЧИИ; семинаре кафедры "Исследования операций" МГУ; семинаре "Проблемы функционирования и развития инфраструктуры народного хозяйства" ВНИИСИ АН СССР; Международной научной конференции "Модели выбора альтернатив в нечеткой среде" (Рига, 1984); Всеобщей научной конференции "Декомпозиция и координация в сложных системах" (Челябинск, 1986).

Публикация. По теме диссертации опубликовано двенадцать работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений; содержащих 102 страниц основного текста, 16 рисунков, 58 наименований литературы, приложения на 28 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ задачи комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей и методов решения возникающих при этом задач синтеза структуры транспортной сети и системы. Задача комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей имеет широкую область применения. В частности, такая задача возникает при проектировании системы обустройства месторождения полезных ископаемых. Сети, входящие в систему обустройства, не являются независимыми. Некоторые пункты являются источниками нескольких продуктов, и при совпадении коммуникаций в различных сетях (образование коридора коммуникаций) стоимость строительства коммуникаций снижается. Снижение стоимости достигается за счет экономии материальных ресурсов, исключения однотипных операций, уменьшения отвода земель и т.д. и может достигать десятков тысяч рублей на 1 км. коммуникаций. В дальнейшем под транспортной системой будем понимать совокупность взаимодействующих описанным выше образом транспортных сетей, расположенных в одном регионе.

Анализ работ Р.К.Прима, Ю.Ю.Финкельштейна, В.А.Трубина, В.Р.Хачатурова, А.В.Злотова, Д.Т.Лотарева, Э.А.Ахлателова и других советских и зарубежных специалистов показал, что прямое решение задачи проектирования транспортной системы в целом невозможно ввиду большой размерности задачи и сложности критерия оптимальности. Существующие методы проектирования транспортных сетей основаны на декомпозиции задачи проектирования на три последо-

вательно решаемые задачи (рис. I).

Декомпозиция задач проектирования

Проектирование транспортной системы

Проектирование транспортной сети

Модели местности

Синтез структуры системы

без потоков.

$$\sum_{(i,j) \in T_1} w_{ij}^{(1)} + \sum_{(i,j) \in T_2} w_{ij}^{(2)} + \\ + \sum_{(i,j) \in T_1 \cap T_2} w_{ij}^{(1)} - w_{ij}^{(1)} - w_{ij}^{(2)} \rightarrow \min \\ (T_1, T_2) \in \mathcal{P}_1 \times \mathcal{P}_2$$

с потоками

$$\sum_{(i,j) \in T_1} w_{ij}^{(1)} + v_{ij}^{(1)} y_{ij}^{(1)} + \sum_{(i,j) \in T_2} w_{ij}^{(2)} + v_{ij}^{(2)} y_{ij}^{(2)} + \\ + \sum_{(i,j) \in T_1 \cap T_2} w_{ij}^{(1)} - w_{ij}^{(1)} - w_{ij}^{(2)} \rightarrow \min \\ (T_1, T_2) \in \mathcal{P}_1 \times \mathcal{P}_2$$

Синтез структуры сети

для достоверной исходной информации

$$\sum_{(i,j) \in T} w_{ij} + v_{ij} y_{ij} \rightarrow \min \\ T \in \mathcal{P}$$

для неопределенной исходной информации

$$\alpha \sum_{(i,j) \in T} w_{ij} + \beta \sum_{(i,j) \in T} v_{ij} y_{ij} \rightarrow \min \\ T \in \mathcal{P}$$

Агрегированная модель

Размещение узлов ветвления при заданной структуре

ЦМТЭПТ

Трассировка коммуникаций

ЦМТЭПТ

Рис. I

Исходная задача решается на цифровой модели технико-экономических показателей территории (ЦМТЭПТ), задаваемой регулярным решетчатым неорграфом. Также на ЦМТЭПТ решаются задачи размещения узлов ветвления и трассировки коммуникаций. Для задачи синтеза структуры сети на основе ЦМТЭПТ строится агрегированная модель местности, которая представляет собой полный граф на множестве источников и стоке. Размерность такой модели в среднем на три порядка меньше размерности ЦМТЭПТ.

Задачи размещения узлов ветвления и трассировки коммуникаций сравнительно хорошо изучены, существуют эффективные алгоритмы их решения. Задача синтеза структуры сети (в дальнейшем задача синтеза сети) имеет основополагающее значение в приведенной

схеме декомпозиции. При проектировании транспортной системы целесообразно использовать ту же схему декомпозиции (Рис. I). Учет взаимного влияния сетей необходим прежде всего при синтезе структур сетей, входящих в систему, т.е. при синтезе структуры системы.

Экономико-математическая модель задачи синтеза сети имеет следующий вид. Пусть $G = (V, E)$, где $V = I \cup \{i_0\}$, I - множество источников продукта, которые необходимо связать сетью со стоком i_0 (в случае нескольких стоков вводится единый фиктивный сток). E - множество допустимых коммуникаций - множество ребер графа G . $\forall i \in I$ задана мощность источника $P_i \geq 0$. Потребность стока $P_{i_0} = - \sum_{i \in I} P_i$, $\forall (i, j) \in E$ задана стоимость строительства коммуникации (сюда же входят затраты на поддержание коммуникаций в рабочем состоянии) - $w_{ij} \geq 0$, и стоимость транспортировки единицы продукта по коммуникации - $u_{ij} \geq 0$. Известно, что при этих условиях оптимальная сеть может быть только стягивающим деревом (СД) графа G и задача синтеза сети в комбинаторной постановке имеет следующий вид:

$$F(T) = \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} + \delta_{ij} u_{ij} \rightarrow \min, \quad T \subseteq \mathcal{P}, \quad (1)$$

где T - СД графа G , u_{ij} - поток продукта по ребру (i, j) , который при заданных мощностях источников полностью определяется деревом T , \mathcal{P} - множество всех СД графа G .

Проектирование транспортной системы часто происходит в условиях неопределенности исходной информации, порождаемой зависимостью от системы более высокого ранга и неопределенностью характеристик обслуживаемого объекта. Так, например, для транспортной системы, входящей в систему обустройства месторождения, это зависимость от системы обустройства района и неопределенность характеристик месторождения. В работе показано, что в этом случае для величин w_{ij} , u_{ij} известны лишь пределы их изменения. В этом случае задача синтеза сети имеет следующий вид:

$$\tilde{F}(T) = \alpha \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} + \beta \sum_{(i,j) \in E} u_{ij} \rightarrow \min, \quad T \subseteq \mathcal{P}, \quad (2)$$

где α и β - некоторые неопределенные параметры, $\alpha, \beta \geq 0$.

Возможен и другой подход к учету неопределенности исходной информации, основанный на теории нечетких множеств. В этом случае α и β считаются нечеткими подмножествами R'_+ , заданными функциями принадлежности, которые отражают мнение проектировщика относительно возможности конкретных значений параметров.

Далее предлагается экономико-математическая модель задачи

синтеза транспортной системы. Пусть $G = (V, E)$, $V = I_1 \cup I_2 \cup \{f_0\}$, $E = E_1 \cup E_2$, где I_K - множество источников K -го продукта, $K = 1, 2$.

$\Sigma_{i=0}^K$ - общий сток продуктов, E_K - множество коммуникаций, соединяющих источники K -го продукта между собой и со стоком.

$E_K = \{(l, j) | l, j \in I_K \cup \{f_0\}\}, K = 1, 2$. $I_1 \cap I_2 \neq \emptyset$, т.е. часть вершин является источниками двух продуктов. $\forall i \in I_K$ задана мощность вершин $P_i^{(K)} \geq 0$, $K = 1, 2$. Потребность стока по K -му продукту $P_{f_0}^{(K)} = \sum_{i \in I_K} P_i^{(K)}$, $\forall (i, j) \in E_K$ задана стоимость строительства коммуникаций $w_{ij}^{(K)} \geq 0$ и стоимость транспортировки единицы K -го продукта $b_{ij}^{(K)} \geq 0$, $K = 1, 2$. Кроме того, $\forall (i, j) \in E_1 \cup E_2$ задана стоимость прокладки коридора коммуникаций $w_{ij}^{(0)} \geq 0$, причем выполняется следующее условие:

$$\max \{w_{ij}^{(1)}, w_{ij}^{(2)}\} \leq w_{ij}^{(0)} \leq w_{ij}^{(1)} + w_{ij}^{(2)}$$

Задача синтеза транспортной системы имеет следующий вид:

$$F(T_1, T_2) = \sum_{(i, j) \in E_1} w_{ij}^{(1)} + c_{ij}^{(1)} y_{ij}^{(1)} + \sum_{(i, j) \in E_2} w_{ij}^{(2)} + b_{ij}^{(2)} y_{ij}^{(2)} + \sum_{(i, j) \in E_1 \cup E_2} w_{ij}^{(0)} - w_{ij}^{(1)} - w_{ij}^{(2)} \rightarrow \min, (T_1, T_2) \in S_{T_1} \times S_{T_2}. \quad (3)$$

Вид целевых функций в задачах (1)-(3) позволяет предположить, что возможна дальнейшая декомпозиция задач на основе предложенного П.С.Краснощековым, В.В.Морозовым и В.В.Федоровым подхода.

При определенном выборе частных критериях решение задачи (2) может быть получено практически без дополнительных затрат благодаря наличию множества Парето. Таким образом, существенный практический интерес представляет разработка методики комплексного проектирования транспортных сетей, основанной на декомпозиционном подходе. Исходя из этого сформулированы приведенные выше цель и задачи работы.

Во второй главе доказана NP -трудность задач синтеза транспортных сетей и систем. Доказательство NP -трудности задачи (1) строится путем сведения известной NP -полноты задачи о минимальном покрытии (ЗМП) к данной задаче. Задача (3) NP -трудна, так как она является обобщением задачи (1).

Для применения декомпозиционного подхода Краснощекова-Морозова-Федорова необходимо ввести "более простые" частные критерии, такие, что выполняется следующее условие монотонности:

Пусть исходная задача имеет вид

$$F(x) \rightarrow \min, x \in X. \quad (4)$$

$U(x) = (U_1(x), \dots, U_m(x)) \rightarrow \min$ - вектор частных критерий.

Условие монотонности выполняется если $\forall x, x'$ таких, что

$\forall i = 1, m \quad U_i(x') \leq U_i(x)$, справедливо неравенство $F(x') \leq F(x)$

Очевидно, что для задач комбинаторной оптимизации "более простыми" критериями следует считать такие частные критерии, что соответствующие им задачи распознавания принадлежат классу P .

Для задачи (1) можно ввести следующие частные критерии:

$$U_1(T) = \sum_{(i,j) \in T} w_{ij} \rightarrow \min \quad (5)$$

$$U_2(T) = \sum_{(i,j) \in T} v_{ij} \cdot y_{ij} \rightarrow \min \quad (6)$$

Критерий (5) на допустимом множестве \mathcal{R} приводит к задаче о минимальном стягивающем дереве (МСД), принадлежащей классу P .

Критерий (6) на \mathcal{R} приводит к задаче о дереве кратчайших путей, также принадлежащей P . Условие монотонности выполняется, так как $F(T) = U_1(T) + U_2(T)$.

Для задачи (3) вводятся следующие частные критерии:

$$U_1(T_1, T_2) = \sum_{(i,j) \in T_1} w_{ij}^{(1)} \rightarrow \min \quad (7)$$

$$U_2(T_1, T_2) = \sum_{(i,j) \in T_2} w_{ij}^{(2)} \rightarrow \min \quad (8)$$

$$U_3(T_1, T_2) = \sum_{(i,j) \in T_1} v_{ij}^{(1)} \cdot y_{ij}^{(1)} \rightarrow \min \quad (9)$$

$$U_4(T_1, T_2) = \sum_{(i,j) \in T_2} v_{ij}^{(2)} \cdot y_{ij}^{(2)} \rightarrow \min \quad (10)$$

$$U_5(T_1, T_2) = \sum_{(i,j) \in T_1, T_2} w_{ij}^{(1)} - w_{ij}^{(2)} \cdot y_{ij}^{(2)} \rightarrow \min \quad (II)$$

Критерии (7), (8) совпадают с (5), а (9), (10) с (6), следовательно, соответствующие им задачи принадлежат P . Критерий (II) на \mathcal{R} приводит к задаче о максимальном стягивающем дереве, так же принадлежащей классу P . Условие монотонности выполняется, так как $F(T_1, T_2) = \sum_i U_i(T_1, T_2)$.

В соответствии с декомпозиционным подходом, глобальный экстремум задачи (4) достигается на множестве Парето задачи

$$U(x) \rightarrow \min, x \in P_x. \quad (12)$$

Пусть P_x - множество Парето задачи (12) в пространстве частных критериев, $P_{\bar{x}}$ - в пространстве альтернатив, тогда задача (4) сводится к задаче

$$F(x) \rightarrow \min, x \in P_x. \quad (13)$$

Если существует функциональная зависимость между $F(x)$ и вектором частных критериев, т.е. $F(x) = \Phi(U(x))$, то задача (4) сводится к задаче

$$\Phi(U) \rightarrow \min, U \in P_U. \quad (14)$$

При построении множества Парето для задач (1) и (3) невозможно применение традиционных методов в связи с NP -трудностью возникающих при этом вспомогательных задач. Для решения задач (1) и (3) в работе предлагается общая схема, основанная на некотором разбиении множества допустимых альтернатив. Предположим,

Что возможно разбиение допустимого множества X на подмножества $X_i^{(k)}, i=1, N^{(k)}, k=1, L$, где L - число проходов по допустимому множеству (под проходом понимается большая итерация алгоритма, заключающаяся в выборе точек из множества $X_i^{(k)}, i=1, N^{(k)}$, где k - номер прохода), $N^{(k)}$ - число подмножеств, просматриваемых на K -м проходе. Трудоемкость порождения $x_i^{(k)} \in X_i^{(k)}$ ограничена полиномом от размерности исходной задачи. На K -м проходе строятся множества $P_u^{(k)}$ и $P_x^{(k)}$, которые являются аппроксимациями множеств P_u и P_x . Для этого проверяется эффективность точек $x_i^{(k)}, i=1, N^{(k)}$, во множестве $P_x^{(k)}$, эффективные точки добавляются к множеству, а доминируемые ими точки исключаются. Множество $P_u^{(k)}$ есть отображение $P_x^{(k)}$ в пространство частных критериев. Множество $P_x^{(k)}$ или $P_u^{(k)}$ используется для приближенного решения задачи (4) путем запоминания рекордного значения $F(x)$, $x \in P_x^{(k)}$ ($\Phi(u)$, $u \in P_u^{(k)}$). Это дает верхнюю оценку на каждом проходе. Ввиду конечности X существует $L=L^*$, для которого $P_u^{(L^*)} = P_u$, $P_x^{(L^*)} = P_x$, а $\min_{x \in P_u^{(L^*)}} F(x) \leq \min_{x \in X} F(x)$. Для реальных задач величина L^* оказывается недопустимо большой (в силу NP -трудности задачи) и L приходится выбирать исходя из имеющихся вычислительных ресурсов. Погрешность полученного решения оценивается величиной $|F_L - \Phi(U_1^{(1)}, U_2^{(2)}, \dots, U_m^{(m)})|$, где $F_L = \min_{x \in P_x^{(L)}} F(x)$, $U_i^{(i)} = \min_{x \in P_x^{(L)}} U_i(x)$, $i=1, m$.

Способ разбиения допустимого множества альтернатив описан в главах 3 и 4. В работе отмечается, что общая схема может быть использована для решения некоторого класса NP -трудных задач комбинаторной оптимизации.

В третьей главе на основе предложенной общей схемы разработан приближенный алгоритм решения задачи синтеза транспортной сети, имеющий полиномиальную трудоемкость. Для построения множества Парето модифицирован алгоритм Габова^{*} генерации деревьев в порядке возрастания их веса. Алгоритм синтеза оптимальной транспортной сети заключается в следующем.

На предварительном этапе строится множество $CP_u^{(0)}$, заведомо включающее P_u . Для этого определяются следующие величины: $U_1^{(1)} = \min_{T \in \Omega} U_1(T)$, $T_* = \arg \min_{T \in \Omega} U_1(T)$, $U_2^{(2)} = \min_{T \in \Omega} U_2(T)$, $T^* = \arg \min_{T \in \Omega} U_2(T)$, $U_1^{(2)} = U_1(T^*)$, $U_2^{(2)} = U_2(T_*)$, $CP_u^{(0)} = [U_1^{(1)}, U_1^{(2)}] \times [U_2^{(2)}, U_2^{(1)}]$, $P_u^{(0)} = \{U_1(T_*)\}, U(T^*)\}$.

*) Gabow H.N. Two algorithms for generating weighted spanning trees in order // SIAM J. Comput.-1977.- V.6, N.1.-p. 139-150.

Пусть T - СД графа G . T - обмен есть пара ребер графа e и f , где $e \in T, f \notin T$, причем, $(T \setminus \{e\}) \cup \{f\}$ - есть СД G . Вес T - обмена e, f равен $w_e - w_f$; L - список ребер графа G ; F - массив предшественников, задающий дерево T . Всякое дерево содержит выделенную вершину l_0 - корень; $F(l_0) = \emptyset, \forall l \neq l_0, F(l)$ - предшественник l на пути от корня к l ; IN, OUT - списки ребер, позволяющие избежать повторной генерации деревьев.

Алгоритм состоит из процедуры $EXALL$ и главной процедуры $GENP$. Процедура $EXALL(F, IN, OUT)$ предназначена для нахождения всех допустимых T - обменов, порождающих СД, не превосходящие по весу T^* . Допустимым называется T - обмен e, f такой, что $e \in T \setminus IN, f \in G \setminus (T \cup OUT)$.

Основной информационной структурой процедуры $GENP$ является список Q . Каждый узел списка позволяет построить множество СД \mathcal{S}_T , порождаемых генератором из дерева T . Узел имеет следующий вид: $(U_i(T), U_2(T), e, f, F, IN, OUT)$, где F - массив предшественников, задающий дерево T , $e, f \in T$ - обмен, порождающий дерево $T' \in \mathcal{S}_T$, IN - список ребер, которые должны содержаться во всех СД, принадлежащих \mathcal{S}_T , OUT - список ребер, которые не должны присутствовать во всех деревьях \mathcal{S}_T . Список Q состоит из N подсписков. Изначально все подсписки пусты. В процессе работы $GENP$ к i -му подсписку ($i \neq N$) присоединяются (в начало подсписка) узлы, в которых $U_i(T) \in [U_i(T_k) + \Delta U_i(i-1), U_i(T^*) + \Delta U_i(i)]$, где $\Delta U_i = (U_i(T^*) - U_i(T_k)) / N$. Для последнего подсписка $U_i(T) \in [U_i(T_k) + \Delta U_i(N-1), U_i(T^*)]$. Для постановки узла в список и выбора узла из списка требуется время $O(1)$.

Процедура $GENP$ генерирует СД по весу не превосходящие T^* . $GENP$ выполняет M проходов, на каждом проходе СД генерируются в порядке возрастания веса. Для сгенерированного дерева T вычисляется значение $U_2(T)$ и проверяется эффективность точки $(U_1(T), U_2(T))$ в $P^{(K)}$. Для эффективных точек вычисляется значение критерия $F(T)$, которое сравнивается с рекордом. Если рекорд превзойден, запоминается новый рекорд. Процедура завершается либо после выполнения M проходов, либо сгенерировав все деревья не превосходящие по весу T^* .

Трудоемкость $GENP$ не превосходит трудоемкости алгоритма Габова, т.е. $O(K/E)$, где K - число сгенерированных остовов. Параметры M и N задаются исходя из имеющихся вычислительных ресурсов. При достаточно большой величине $K/(K \geq \#\{T \in \mathcal{S} | U_i(T) \leq U_i(T^*)\})$ будет получено точное решение задачи (I).

Далее рассматривается два подхода к учету неопределенности исходной информации. Первый заключается в оценке чувствительности решения к изменению исходных данных и может служить для уточнения предпочтений проектировщика относительно значений параметров задачи либо позволяет получить множество решений задачи (3) для последующего выбора варианта решения проектировщиком. Под оценкой чувствительности решения понимается следующее:

1) для любых значений параметров α и β находится оптимальное решение (3), соответствующее этим значениям (решение непосредственно выбираются из эффективных точек в пространстве критериев U_1, U_2);

2) для данного решения задачи (3) находятся пределы изменения параметров, при которых это решение остается оптимальным. Эти значения параметров могут быть найдены непосредственно из графического изображения эффективных точек в пространстве критериев U_1, U_2 .

Наличие множества Парето (или его аппроксимации), получаемого в качестве промежуточного результата алгоритмом, описанным выше, позволяет оценить чувствительность решения задачи (3) к изменению параметров α и β практически без дополнительных вычислительных затрат.

Второй подход основан на методах нечеткого математического программирования (НМП). Ставится задача синтеза сети с нечетким сроком эксплуатации. Такой случай характерен для сетей обустройства месторождений полезных ископаемых. В свою очередь от срока эксплуатации зависят параметры экономико-математической модели задачи синтеза сети. Для решения поставленной задачи НМП используется декомпозиционный подход с выделением двух четких частных критериев (5) и (6). В результате применения схемы декомпозиции исходная задача НМП сводится к задаче минимизации линейной целевой функции с нечетким "параметром" на множестве альтернатив в пространстве R^2 , которая легко может быть решена известными методами.

В четвертой главе сначала решается вспомогательная задача определения стоимости коридора коммуникаций. Необходимость решения этой задачи вызвана тем, что коммуникации совпадающие на агрегированной модели могут частично не совпадать на ЦМГЭПТ. Для решения задачи осуществляется трассировка независимых коммуникаций. Полученные поля пометок суммируются, и на этом поле пометок осуществляется трассировка коридора коммуникаций.

Для решения задачи синтеза системы разработан приближенный алгоритм полиномиальной трудоемкости, основанный на схеме главы 2. Синтез системы сводится к многократному решению задачи синтеза сети (рис. 2):

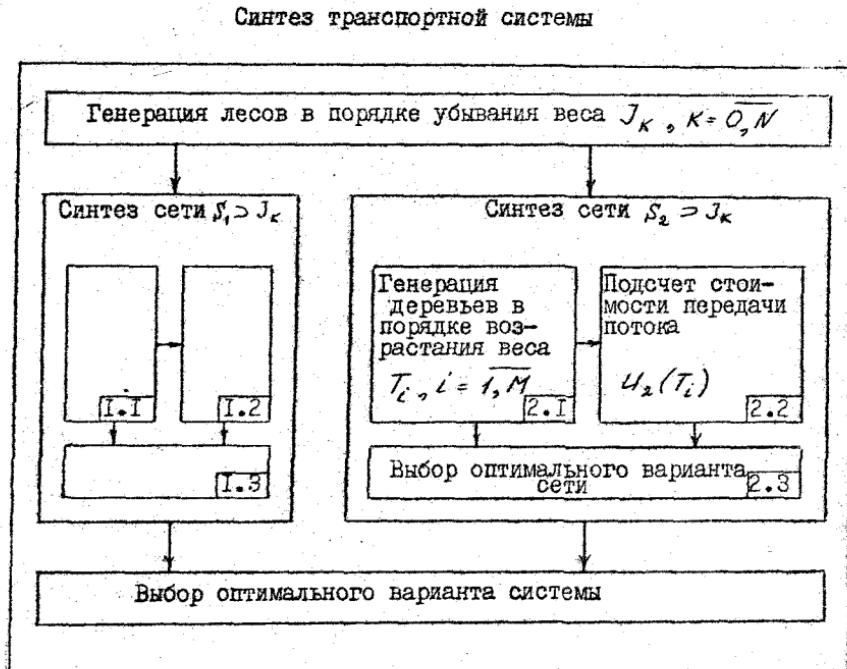


Рис. 2.

Вводятся новые частные критерии и соответствующие им частные задачи:

$$W(T_1, T_2) = \sum_{i=1}^4 U_i(T_1, T_2) \rightarrow \min, (T_1, T_2) \in \Omega_1 \times \Omega_2 \quad (15)$$

$$V(T_1, T_2) = -U_5(T_1, T_2) \rightarrow \max, (T_1, T_2) \in \Omega_1 \times \Omega_2 \quad (16)$$

Критерии W и V позволяют построить множество $CP_U^{(o)}$ (покрывающее множество Парето) меньшей мощности, по сравнению с критериями (7)-(II). Задача (15) распадается на две независимые задачи синтеза сети, которые могут быть решены алгоритмом из главы 3. Решение задачи (15) - (T_1^*, T_2^*) есть оптимальные сети для каждого из продуктов без учета их взаимовлияния. Отображение (T_1^*, T_2^*) в пространство критериев W и V есть крайняя

точка множества Парето. Решение задачи (16) - J_0 есть максимальное СД графа $G_0 = (I, \Pi I_2, V\{J_0\}, E, \Pi E)$. Для построения второй крайней точки необходимо решить задачу

$$W(T_1, T_2) \rightarrow \min, (T_1, T_2) \in \mathcal{R}^{(0)} \times \mathcal{R}^{(0)}, \quad (17)$$

где $\mathcal{R}_i^{(0)} = \{T \in \mathcal{R}_i \mid J_0 \subset T\}, i=1,2$. Для решения этой задачи также можно использовать алгоритм главы 3, если поместить все ребра принадлежащие J_0 в список IN при первом обращении к процедуре $EXALL$.

Для построения множества \mathcal{R}_0 в пространстве частных критериев W и V применен алгоритм генерации лесов графа в порядке убывания веса с последующим решением задач синтеза сети, включающей данный лес, для чего может быть использован алгоритм главы 3. Для этого критерий U_1 заменяется критерием $V, U_2 - W$. Понятие T - обмена, определенное в главе 3, распространяется на случай леса следующим образом. Пусть J - лес на множестве вершин графа $G = (V, E)$. J - обмен есть пара ребер e, f , где $e \in J, f \in (E \setminus J) \cup \{\emptyset\}$ и $(J \setminus \{e\}) \cup \{f\}$ - также является лесом (\emptyset означает фиктивное ребро). Узел списка Q имеет следующий вид: $(V(T_1 \cap T_2'), W(T_1, T_2), e, f, F, IN, OUT)$, где (T_1', T_2') - система, полученная при помощи J - обмена e, f из системы (T_1, T_2) . В процедуре $GENP$ добавляется блок анализа вводимого ребра. Если вводится пустое ребро, или вершины вводимого ребра принадлежат разным компонентам связности, то выводится произвольное ребро.

Условие допустимости J - обмена имеет вид:

$$V(J) + \gamma \geq V(J_{min}), \text{ где } J_{min} = T_1 \cap T_2, \gamma = w_f - w_e.$$

В процедуре $GENP$ к списку ребер L добавляется пустое ребро. В качестве шага выбирается $\Delta V = (V(J_0) - V(J_{min})) / N$. Вместо вычисления ΔU_2 в процедуре решается задача

$$W(T_1, T_2) \rightarrow \min, (T_1, T_2) \in \mathcal{R}_1^{(k)} \times \mathcal{R}_2^{(k)}, \quad (18)$$

где $\mathcal{R}_i^{(k)} = \{T \in \mathcal{R}_i \mid J_k \subset T\}, i=1,2$

Трудоемкость алгоритма оценивается величиной $O(K(E_0 + R))$, где $K = MN$ - число сгенерированных лесов, $E_0 = E_1 \cap E_2$, R - трудоемкость решения задачи (18), оцененная в главе 3. При $K \geq \geq |\{J \in \mathcal{Y} \mid V(J) \geq V(J_{min})\}|$, где \mathcal{Y} - множество лесов графа, будет получено точное решение задачи (3) (при условии что задачи вида (18) на каждом шаге решаются точно). Практически точное решение получить невозможно. В соответствии с общей схемой погрешность полученного решения оценивается величиной $|F_M - W(T_1^*, T_2^*) + V(J_0)|$, где F_M - приближенное решение, полученное после M проходов.

Основная трудоемкость алгоритма приходится на решение задач (18). Вследствии неопределенности исходной информации

решением задачи (18) может служить некоторое множество сетей, что требует привлечения проектировщика для выбора единственной сети. Учитывая также большую размерность задач разработан приближенный алгоритм решения задачи (3) не требующий многократного решения задач вида (18). Предлагаемый алгоритм основан на эвристической стратегии прохода допустимой области. Для выбора оптимальной стратегии проведены численные эксперименты. Сравнивались следующие стратегии: локальный поиск по окрестности (T_1^*, T_2^*) , задаваемой метрикой пространства выборок; случайное зондирование $\mathcal{CP}_4^{(0)}$; регулярное, в порядке возрастания V , зондирование $\mathcal{CP}_4^{(0)}$ начиная с (T_1^*, T_2^*) . Эксперименты показали, что целевая функция задачи (1) полога в области минимума и наилучшие результаты дает последняя стратегия. Трудоемкость алгоритма - $O(1I_1 \cdot 1I_2 \cdot \max\{I_1, I_2\})$.

В пятой главе рассмотрено приложение разработанной в диссертации методики комплексного проектирования транспортных сетей к задаче синтеза оптимальной структуры транспортной системы нефтяного месторождения. Описаны существующие методы синтеза структур транспортных систем нефтяных месторождений. Рассмотрены дополнительные ограничения, накладываемые на структуры сетей. Указан подход к решению задачи синтеза системы, состоящей из K сетей ($K > 2$). Представлены примеры синтеза транспортных систем для реальных нефтяных месторождений. На рис. 3 изображена транспортная система нефтяного месторождения, построенная традиционными методами. Система состоит из сети промыслового сбора и сети автомобильных дорог. На рис. 4 изображена транспортная система, построенная с использованием разработанной методики комплексного проектирования транспортных сетей. Анализ полученных результатов показал, что комплексное проектирование сетей ведет к снижению стоимости системы на 5...12% по сравнению с системами, спроектированными традиционными методами. Максимальная размерность по числу источников в решенных задачах - около 100 источников в каждой из сетей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Анализ задачи комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей показал:

- снижение стоимости строительства сетей при совмещении коммуникаций в различных сетях позволяет ввести понятие транспортной системы; системный подход к проектированию транспортных сетей,

Транспортная система, построенная традиционными методами

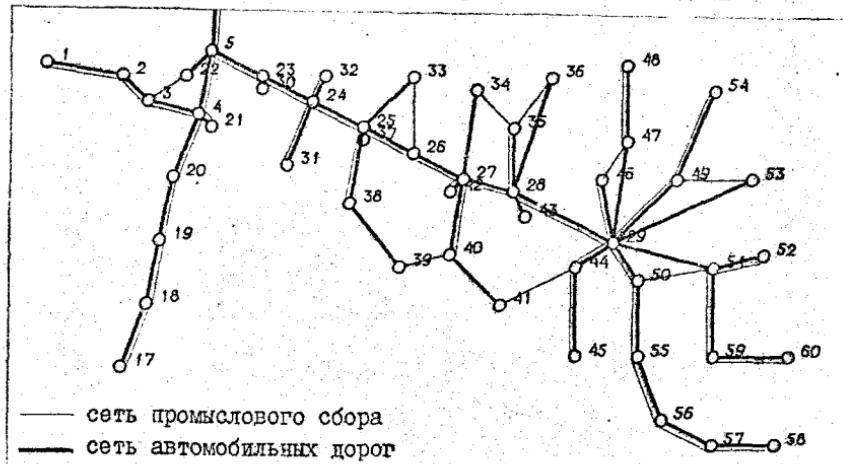


Рис. 3

Транспортная система, построенная с использованием разработанной методики

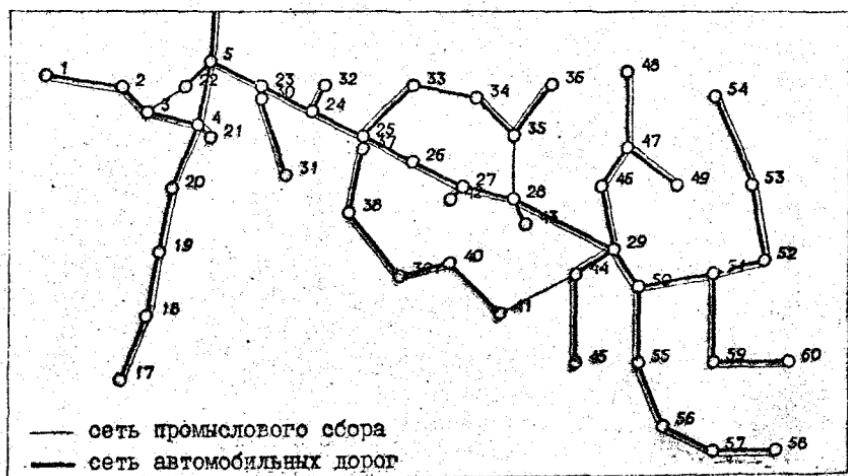


Рис. 4

входящих в систему, позволяет значительно снизить стоимость системы;

- существующие методы синтеза сети встречают серьезные затруднения в случае задач большой размерности, кроме того, затруднено их применение в случае неопределенности исходной информации, которая часто имеет место;

- в настоящее время отсутствуют методы синтеза транспортной системы, позволяющие учитывать распределение потоков по сетям, составляющим систему, в то время как влияние стоимости транспортировки потока по сети на ее структуру существенно.

2. Разработана методика комплексного проектирования крупномасштабных транспортных сетей включающая следующие основные компоненты:

- экономико-математические модели задачи синтеза структуры транспортной сети в условиях неопределенности исходной информации и задачи синтеза транспортной системы с учетом взаимного влияния сетей, входящих в систему;

- общую схему решения задач, основанную на декомпозиционном подходе и позволяющую свести исходную NP - трудную задачу к последовательности задач полиномиальной трудоемкости;

- реализующие общую схему приближенные алгоритмы полиномиальной трудоемкости для решения задач синтеза транспортных сетей и систем, которые позволяют решать задачи в случае неопределенности исходной информации и управлять распределением потоков по сетям.

3. Существует класс NP - трудных задач комбинаторной оптимизации (включаящий задачи синтеза сети и системы) эффективно решаемых на основе декомпозиционного подхода. Для задач из этого класса применима разработанная общая схема решения.

4. Алгоритм синтеза отдельной транспортной сети позволяет решать задачи большой размерности и учитывать неопределенность исходной информации. Предложены два подхода к учету неопределенности исходной информации: на основе оценки чувствительности решения к изменению параметров задачи и на основе методов нечеткого математического программирования.

5. Алгоритм синтеза транспортной системы позволяет решать задачи большой размерности, управлять распределением потоков по сетям, входящим в систему, и учитывать взаимодействие сетей.

6. Программная реализация алгоритмов позволяет использовать предложенную методику комплексного проектирования транспортных

сетей на практике. В работе показана целесообразность применения методики в задачах синтеза транспортных систем нефтяных месторождений. Годовой экономический эффект от внедрения методики в проектирование транспортных систем нефтяных месторождений составляет 410 тыс. руб.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Пельцвергер Б.В., Хавронин О.В. Декомпозиционный подход к задаче синтеза транспортной сети с нечетким сроком эксплуатации // Известия АН СССР. Техническая кибернетика.-1986.-№. -с.32-36.
2. Пельцвергер Б.В., Хавронин О.В. Процедура синтеза больших транспортных сетей и систем // Декомпозиция и координация в сложных системах. Материалы Всесоюзной конференции.-Челябинск: ЧИИ, 1987.-С. 89-105.
3. Хавронин О.В. Приближенный алгоритм координации коммуникационных сетей // II областная научно-техническая конференция. Тезисы докладов конференции.-Челябинск, 1984.-С.78-80.
4. Хавронин О.В. Анализ чувствительности решения задачи синтеза транспортной сети. // Информационные и робототехнические системы. Тематический сборник научных трудов.-Челябинск: ЧИИ, 1985.-С.13-14.
5. Хавронин О.В. Эвристические алгоритмы координации структур стягивающих сетей // Автоматическое управление и устройства в робототехнических системах. Тематический сборник научных трудов.-Челябинск: ЧИИ, 1986.-С. 70-72.
6. Пельцвергер Б.В., Хавронин О.В. Применение теории нечетких множеств в автоматизированном проектировании транспортных сетей // Тезисы докладов межреспубликанской научной конференции "Модели выбора альтернатив в нечеткой среде".-Рига, 1984.-С.162-163.
7. Пельцвергер Б.В. и др. Комплексный подход в автоматизированном проектировании региональных транспортных систем. / Пельцвергер Б.В., Хавронин О.В. Шафир А.Ю. // Тезисы докладов секции "Матем. методы анализа систем" на Всесоюзн. конф. "Теория, методология и практика системных исследований".-М.: ВНИИСИ, 1984.-С.201-203.
8. Пельцвергер Б.В., Хавронин О.В. Координация магистральных ходов на цифровой модели поверхности // III областная научно-техническая конференция. Тезисы докладов конференции.-Челябинск, 1985.-С.116-117.
9. Пельцвергер Б.В. и др. Декомпозиционный подход к коорди-

нированному проектированию региональных транспортных систем // Пельцвергер Б.В., Хавронин О.В., Цыганков В.А. // Управление взаимодействием транспортных систем в регионе. Тезисы докладов региональной конференции.-Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986.-С. 114-115.

10. Пельцвергер Б.В., Хавронин О.В. Декомпозиционный подход и сложность решения дискретных задач оптимизации // Декомпозиция и координация сложных системах. Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции (Челябинск, март 1986 г.) Часть I.-Челябинск: ЧИИ, 1986.-С. 101-103.

11. Хавронин О.В., Шафир А.Ю. Построение множества Парето в двухкритериальной задаче синтеза транспортных сетей / Системы программного обеспечения решения задач оптимального планирования. Девятый всесоюзный симпозиум. Краткие тезисы докладов.-М.: ЦЭМИ АН СССР, 1986.-С. 174-175.

12. Пельцвергер Б.В. и др. Синтез региональных транспортных систем с учетом критериального взаимодействия подсистем / Пельцвергер Б.В., Хавронин О.В., Шафир А.Ю. // Проблемы функционирования и развития инфраструктуры народного хозяйства. Сборник трудов.-М.: ВНИИСИ, вып. 4, 1987.-С. 49-59.

Хавронин