сложные системы управления. Сборник научных трудов 5-ой международной конференции, Краснодар, 2004г. – с. 34-38. (Лично автором выполнено 2 с.)

6. Баркалов П.С., Глагольев А.В., Матвеев И.К. Оптимизация календарного плана работы предприятия при кольцевой системе расположения объектов строительства. В кн. Современные сложные системы управления. Сборник научных трудов 5-ой международной конференции, Краснодар, 2004г. – с. 62-69. (Лично автором выполнено 3 с.)

7. Матвеев И.К., Семенов П.И., Шмелева Е.Ю. Корпоративное управление: основные проблемы и методы их решения. «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» 5 Всеросс. научно-практ. конф. Новокузнецк СибГИУ, 2005г. – с. 70-75. (Лично автором выполнено 3 с.)

8. Баскаков А.С., Глагольев А.В., Матвеев И.К. Моделирование конкурсных механизмов в корпоративных структурах управления. Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 1/Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2005. – с. 104 – 109. (Лично автором выполнено 3 с.)

9. Баркалов С.А., Матвеев И.К., Лихотин Ю.П. Модель календарного графика с учётом времени перемещений бригад. Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 2/Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2005. – с. 184 – 189. (Лично автором выполнено 3 с.)

10.Баркалов С.А., Матвеев И.К. Задача планирования работ по ремонту мостовых сооружений. Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 2/Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2005. – с. 254-258. (Лично автором выполнено 2 с.)

11.Матвеев И.К., Половинкина А.И., Семенов П.И. Модель формирования планов ремонта мостовых сооружений. Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования Материалы междунар. науч. конфер. Воронеж 2005г. – с. 144. (Лично автором выполнено 0,5 с.)

12.Матвеев И.К., Семенов П.И. Разработка планов ремонта мостовых сооружений. Научный вестник ВГАСУ Н.т. журнал Выпуск №2, 2006г. – с. 78 – 83. (Лично автором выполнено 2 с.)

ПЛД № 37-49 от 3 ноября 1998 г. Л.Р. 020450 от 4 марта 1997 г.
Подписано в печать 4.10.2006. Формат 60x84 1/16. Уч. – изд. л. 1,0 Усл.-печ. 1,1 л. Бумага для множительных аппаратов.
Тираж 100 экз. Заказ № 536

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии Воронежского государственного архитектурно-строительного университета
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

На правах рукописи

МАТВЕЕВ ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ

Модели управления эксплуатацией мостовых сооружений

Специальность 05.13.10 – управление в социальных и экономических системах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Научный руководитель	кандидат технических наук **Половинкина Алла Ивановна**
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор **Цыганов Владимир Викторович**
	кандидат технических наук **Остапенко Михаил Дмитриевич**
Ведущая организация -	**ЗАО «Научно-исследовательский и проектный институт территориального развития и транспортной инфраструктуры», (г. Санкт - Петербург)**

Защита диссертации состоится «9» ноября 2006 г. в 12^{00} часов на заседании диссертационного совета К 212.033.01 при Воронежском государственном архитектурно-строительном университете по адресу:
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, ауд. 20, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного архитектурно-строительного университета.

Автореферат разослан «7» октября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Чертов В.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Главнейшей задачей дорожной отрасли России, непосредственно связанной с развитием народного хозяйства, является коренное улучшение состояния автомобильных дорог и сооружений на них. Проблема улучшения состояния автодорожных мостов в России, как наиболее сложных и ответственных элементов автомобильных дорог, усугубляется большим количеством сооружений с неудовлетворительным состоянием, как на дорогах общего пользования России в целом, так и на Федеральной сети.

На дорогах общего пользования страны по данным на 2000 г. эксплуатируется 41800 сооружений (в том числе 33464 шт. капитальных) протяженностью около 1600 км (в том числе 1500 км капитальных сооружений).

В последние 10 лет участились случаи разрушения несущих элементов мостов под эксплуатационными нагрузками или воздействием водного потока. Очень медленно улучшается общее техническое состояние сооружений, не получается пока полностью избавиться от аварийных мостов, большой процент сооружений (более 20%) продолжает оставаться в неудовлетворительном состоянии. Для того, чтобы определить основные (первостепенные) задачи отрасли по улучшению состояния мостовых сооружений и показать роль системы управления мостами в общем процессе совершенствования парка мостов, в настоящей работе приводится анализ состояния искусственных сооружений в увязке с характеристиками всего мостового хозяйства.

Особенно важно в современных условиях характеризующихся острым дефицитом оборотных средств прийти к такой системе управления мостовыми сооружениями, которая с минимальными затратами позволит существенно увеличить отдачу от функционирования мостовых объектов и длительное время сохранять потребительские свойства автомобильных дорог.

Таким образом, **актуальность темы** диссертационной работы определяется необходимостью разработки новых подходов к определению стратегии содержания мостовых сооружений и формирования плана ремонтных работ.

Основные исследования, получившие отражение в диссертации, выполнялись по планам научно-исследовательских работ:

– федеральная комплексная программа «Исследование и разработки по приоритетным направлениям науки и техники гражданского назначения»;

– грант РФФИ «Гуманитарные науки» «Разработка оптимизационных моделей управления распределением инвестиций на предприятии по видам деятельности» № Г00-3.3-306;

– госбюджетная научно – исследовательская работа «Разработка и совершенствование моделей и механизмов внутрифирменного управления».

Цель и постановка задач исследования. Целью диссертации является разработка моделей управления эксплуатацией мостовых сооружений.

Достижение цели работы потребовало решения следующих основных задач:

1. Проанализировать состав парка мостовых сооружений и определить тенденции развития системы эксплуатации мостов.

2. Определить основные варианты содержания мостовых сооружений и затраты, соответствующие каждому варианту.

3. Разработать модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов.

4. Определить множество Парето-оптимальных решений, обеспечивающих эффективное формирование стратегии по содержанию мостовых сооружений по критериям долговечности и величины совокупных затрат.

5. Построить модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба.

6. Разработать модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов.

7. Получить нижнюю оценку решения для задачи минимизации ущерба при нескольких периодах планирования.

8. Построить приближенный алгоритм решения задачи формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

Методы исследования. В работы использованы методы моделирования организационных систем управления, теории активных систем, системного анализа, математического программирования.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов, позволяющая определять наиболее рациональные варианты содержания мостовых сооружений.

2. Модель получения множества Парето-оптимальных решений, обеспечивающих эффективное формирование стратегии по содержанию мостовых сооружений по критериям долговечности и величины совокупных затрат.

3. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба, позволяющая обеспечить наиболее эффективное распределение ограниченных финансовых ресурсов.

4. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов, дающая возможность эффективного распределения финансовых ресурсов при перспективном планировании на несколько временных периодов.

5. Нижняя оценка решения для задачи минимизации ущерба при нескольких периодах планирования, позволяющая применить метод сетевого программирования.

6. Приближенный алгоритм решения задачи формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

Достоверность научных результатов. Научные положения, теоретические выводы и практические рекомендации, включенные в диссертацию,

обоснованы математическими доказательствами. Они подтверждены расчетами на примерах, производственными экспериментами и многократной проверкой при внедрении в практику управления.

Практическая значимость и результаты внедрения. На основании выполненных автором исследований созданы модели определения варианта содержания мостовых сооружений и формирования планов ремонтных работ как при текущем, так и при перспективном (то есть на несколько плановых интервалов времени) планировании.

Использование разработанных в диссертации моделей и механизмов позволяет многократно применять разработки, тиражировать их и осуществлять их массовое внедрение с существенным сокращением продолжительности трудозатрат и средств.

Разработанные модели используются в практике разработки планов производства работ по содержанию мостовых сооружений в Федеральном дорожном агентстве Минтранса РФ, ГУ «Управление федеральных автомобильных дорог “Черноземье”», ГУ «Управление автомобильной магистрали “Москва-Архангельск”».

Модели, алгоритмы и механизмы включены в состав учебного курса «Управление проектами», читаемого в Воронежском государственном архитектурно – строительном университете.

На защиту выносятся:

1. Модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов.

2. Модель получения множества Парето-оптимальных решений.

3. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба.

4. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов.

5. Нижняя оценка решения для задачи минимизации ущерба при нескольких периодах планирования.

6. Приближенный алгоритм решения задачи формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

Апробация работы.

Основные результаты исследований и научных разработок докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах, совещаниях и научных сессиях: международная конференция «Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий» (Москва – Сочи, 2004 г.); международная научно-практическая конференция «Теория активных систем» (Москва, 2005 г.); 5-ая международная конференция «Современные сложные системы управления» (Краснодар, 2004 г.); 5-ая Всероссийская научно-практическая конференция «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2005 г.); международная конференция «Современные сложные системы управления» (Воронеж, 2005 г.); международная научная конференция «Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования» (Воронеж 2005 г.) 60 – 62 научно-технические конференции по проблемам архитектуры и строительных наук (Воронеж, ВГАСУ, 2004-2006 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: в работах [3], [5] автору принадлежит модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов; в работах [1], [4], автору принадлежит модель получения множества Парето-оптимальных решений; в работах [2], [9] автору принадлежит модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба; в работах [8], [10] автору принадлежит модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов; в работах [6], [11] автору принадлежит нижняя оценка решения для задачи минимизации ущерба при нескольких периодах планирования; в работах [7], [12] автору принадлежит приближенный алгоритм решения задачи формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Она содержит 122 страницы основного текста, 22 рисунка, 53 таблицы и приложения. Библиография включает 189 наименований.

Во введении обосновывается актуальность, описывается цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе отмечается, что количество и протяженность мостов на общей сети дорог ежегодно меняется, в связи с чем приводимые статистические данные справедливы для конкретного года статистический отчетности и могут не соответствовать другим опубликованным данным. В тоже время, относительные показатели имеют большую достоверность и более стабильны во времени, поэтому их использование для качественной и количественной оценки парка мостов представляется вполне допустимой и наиболее объективной. Именно поэтому в работе преобладают относительные показатели.

Всего на дорогах общего пользования России эксплуатируется 41,8 тыс. мостов, в том числе капитальных 33,5 тыс. шт., протяженностью около 1500км. В основном это железобетонные мосты (мосты полностью или частично с железобетонными пролетными строениями), число которых составляет 29,5 тыс. шт. Причем конструкции 50^{х}-60^{ч} годов разработки практически все заменены на современные (бездиафрагменные) конструкции.

Одновременно с этим возрос процент пролетных строений с напрягаемой арматурой. В последние годы с напрягаемой арматурой применяли и балки длиной 18м, 15м, а иногда и 12м, что традиционно раньше было областью применения каркасных балок.

На автомобильных дорогах общего пользования Российской Федерации остается все еще значительное количество деревянных мостов - 8,3 тыс. шт. или ~ 100 км, что составляет 19,9% от числа и более 6% от общей протяжен-

ности искусственных сооружений.

В некоторых областях России процент деревянных мостов существенно выше среднего.

Состояние деревянных мостов на общей сети крайне неудовлетворительное. По результатам обследования деревянных мостов в последние годы в Архангельской, Свердловской, Кировской, Вологодской областях более 15% сооружений находятся в аварийном состоянии, а остальная часть требует ремонта.

До сих пор на сети остается большое количество малых мостов. Со временем число малых мостов уменьшается (см. рис.1.1). В основном малые мосты, включая деревянные, расположены на местной сети.

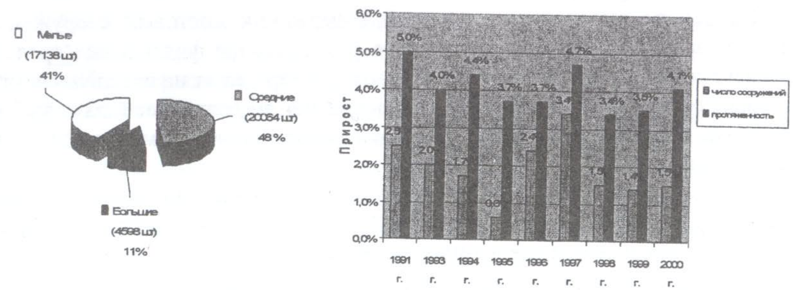

Рис. 1.1 - Соотношение мостов

Анализ особенностей состояния мостовых сооружений позволил установить тенденции и определить проблемы, с которыми придется сталкиваться федеральной службе эксплуатации и управленческому аппарату отрасли.

Таким образом, изучаемую предметную область можно представить двумя конечными дискретными множествами: множеством мостовых сооружений и множеством вариантов их содержания.

Таким образом, любые постановки оптимального выбора стратегии содержания или формирования плана ремонтных работ, связанные с рассматриваемой предметной областью, неминуемо приводят нас к необходимости исследования задач на дискретных множествах, то есть задач дискретного программирования. Рассмотрены основные методы дискретной оптимизации.

Во второй главе отмечается, что теоретической основой содержания мостовых сооружений является сохранение надежности и повышение долговечности конструкций за счет своевременного выполнения в необходимом (научно-обоснованном) объеме комплекса мероприятий на различных этапах функционирования сооружения. К таким «мероприятиям» относятся 120 видов конкретных работ, объединенных в три группы:- уход - нормативные, постоянно выполняемые работы (33 вида работ) с целью сохранения первоначального состояния и исключения появления дефектов и повреждений в раннем возрасте; профилактика - сверхнормативные работы (55 видов работ), выполняемые с интервалом 2-5 лет с целью снижения темпов начавшихся деградационных процессов в материалах и элементах; планово-предупредительные работы (ППР) - специальные работы (32 вида работ), выполняемые с целью предупреждения нарушения (раннего исчерпания) работоспособности элементов и конструкций за счет устранения накопившегося в них износа, размер которого еще не превысил допустимого уровня.

Основной задачей службы эксплуатации мостов является не только получение и накопление информации о состоянии парка мостовых сооружений страны, но и дифференцированно распределять средства, то есть регулировать финансирование в зависимости от принятой стратегии эксплуатации. При правильном содержании объекта, то есть выполнении работ, относящихся в первую очередь к надзору, уходу, профилактике вообще может не потребоваться ремонта.

На основе выделенных стратегий содержания мостовых сооружений, возникает задача наиболее эффективного расходования финансовых средств, выделяемых эти цели, то есть учитывая, что размер затрат на содержание моста зависит от приятного варианта его содержания, то возникает задача выбора варианта содержания для каждого мостового сооружения в рамках выделенного на эти цели бюджета.

В этом случае возникает несколько постановок оптимизационных задач. Дадим их формальное описание. Для этой цели введем двоичную переменную x_{ij}, которая определяется следующим образом: $x_{ij} = 1$, в том случае, если для i-го мостового сооружения прият j-ый вариант содержания и ноль – в противном случае. Затраты на реализацию j-го варианта содержания на i-ом мосту обозначим через c_{ij}.

Для характеристики параметра долговечности введем индекс долговечности, определяемый как произведение долговечности на длину пролета мостового сооружения, то есть $T_{ij}=t_{ij}L_i$.

Тогда возможно сформулировать следующие задачи:

Задача 1. При заданном уровне затрат получить варианты содержания для каждого мостового сооружения обеспечивающие максимальное приращение интегрального значения индекса долговечности. Формальная постановка задачи может быть записана в следующем виде

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} T_{ij}x_{ij} \to \max, \ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij} \le R, \ \sum_{j=1}^{m} x_{ij} = 1, \ i = \overline{1,n} \qquad (1)$$

Последнее ограничение в выражении (1) означает, что для каждого из мостовых сооружений должен быть принят какой – либо вариант содержания.

Задача 2. Определить варианты содержания для каждого моста, при котором достигалось бы нормативное значение индекса долговечности и при этом обеспечивалось бы минимальное значение затрат.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij} \to \min, \ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} T_{ij}x_{ij} \le T, \ \sum_{j=1}^{m} x_{ij} = 1, \ i = \overline{1,n} \qquad (2)$$

Здесь R – объем средств выделяемых на содержание мостовых сооружений; T – нормативное значение долговечности по группе мостовых сооружений; n – количество мостовых сооружений; m – количество вариантов содержания.

Задачи (1) и (2) относится к классу задач комбинаторного программирования. Для их решения применимы метод ветвей и границ, метод динамического программирования, метод дихотомического программирования. Из всех приведенных методов, наиболее эффективен метод дихотомического программирования, теоретические основы которого разработаны в работах В.Н.Буркова и И.В. Бурковой.

Данный метод будет наиболее удобным еще и потому, что проделав процедуру решения один раз, причем для любой из поставленных задач, мы в итоге получаем итоговую таблицу, которая содержит решения и первой и второй задач в постановке (1) – (2).

Рассмотрим применение алгоритма дихотомического программирования к задаче выбора оптимальной стратегии содержания группы мостовых сооружений на период их эксплуатации.

Пусть имеется четыре мостовых сооружения и три варианта их содержания (размерность задачи особого значения иметь не будет, так как от этого будет зависеть только объем вычислений, учитывая, что все вычисления будут проводиться вручную, ограничимся рассмотрением задачи небольшой размерности). Данные о затратах (числитель) и величине индекса долговечности (знаменатель), представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Данные о затратах и величине индекса долговечности

i / Вариант	1	2	3	4
I вариант	$\frac{2}{200}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{4}{400}$	$\frac{10}{1000}$
II вариант	$\frac{3}{400}$	$\frac{3}{150}$	$\frac{8}{600}$	$\frac{15}{1500}$
III вариант	$\frac{4}{400}$	$\frac{5}{200}$	$\frac{13}{800}$	$\frac{17}{2000}$

Для решения поставленной задачи приведем дихотомическое представление предстоящего решения, представленное на рис. 2.1.

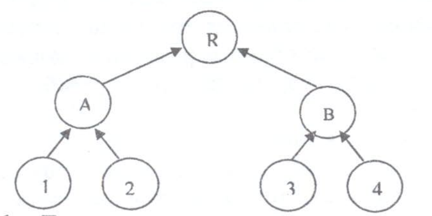

Рис. 2.1 – Дихотомическое представление решения

Если рассмотреть один мост, то решение будет достаточно очевидным: имеющийся объем финансирования однозначно определит выбор варианта содержания объекта. В том случае, когда имеется два мостовых сооружения, то возможно уже несколько вариантов по их содержанию. Совокупность этих вариантов представлена на рис. 2 набором ***A*** и т. д. Составляя таблицы возможных вариантов для набора А и В, в итоге приходим к результирующей таблице табл. 2.

Таблица 2 – Результирующая таблица

$\frac{30}{2800}$	$\frac{35}{3150}$	$\frac{37}{3200}$	$\frac{38}{3300}$	$\frac{39}{3400}$
$\Rightarrow \frac{28}{2300}$	$\frac{33}{2650}$	$\frac{35}{2700}$	$\frac{36}{2800}$	$\frac{37}{2900}$
$\frac{23}{1800}$	$\frac{28}{2150}$	$\frac{30}{2200}$	$\frac{31}{2300}$	$\frac{32}{2400}$
$\frac{18}{1600}$	$\frac{23}{1950}$	$\frac{25}{2000}$	$\frac{26}{2100}$	$\frac{27}{2200}$
$\frac{14}{1400}$	$\frac{19}{1750}$	$\frac{21}{1800}$	$\frac{22}{1900}$	$\frac{23}{2000}$
B / A	$\frac{5}{350}$	$\frac{7}{400}$	$\frac{8}{500}$	$\frac{9}{600}$

Теперь, если стоит задача, при имеющимся объеме финансирования, определить оптимальную стратегию содержания рассматриваемых четырех мостов, то по табл. 2 находим в числителе таблицы значение, наиболее близкое к имеющемуся объему денежных средств. Найденному значению будет соответствовать максимально возможная, для заданного объема финансирования, величина индекса долговечности. По этой же таблице находим какие значения наборов ***A*** и ***B*** будет соответствовать найденному значению индекса долговечности. Окончательное решение получаем в результате обратного хода по дихотомическому представлению задачи приведенному на рис. 2. Например, если предполагается поступление ресурса в объеме 33 единицы, то по табл. 2 находим, что это соответствует индексу долговечности равному 2650 (в таблице соответствующая клетка выделена цветом). Найденное значение соответствует значениям промежуточных сверток А и В равным $\frac{5}{350}$ и $\frac{28}{2300}$, соответственно (в таблице эти значения отмечены стрелками). Двигаясь в обратном направлении по дихотоимческому дереву задачи получаем, что оптимальному варианту содержания при данном бюджете будет соответствовать вариант, согласно которому первый мост должен содержаться по первому варианту, второй по второму варианту, третий - по третьему варианту, а четвертый – по второму.

Как уже упоминалось выше, мы фактически решили не одну задачу, а, как минимум две, то есть задачу 2 так же можно решать, используя приведенные построенные таблицы, только в этом случае в итоговой таблице ищется число, находящееся в знаменателе и наиболее близкое к заданному нормативному значению индекса долговечности.

Но этим еще не исчерпываются достоинства полученного решения.

Рассмотрим задачу многокритериальной оптимизации, когда в качестве критериев оптимизации выступают два взаимно противоположных критерия: индекс долговечности и размер затрат. Пусть необходимо выбрать вариант содержания каждого мостового сооружения из условия, что индекс долговечности должен принимать максимальное значение, а размер затрат должен быть минимальным. То есть формальная постановка задачи имеет следующий вид

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} T_{ij}x_{ij} \to \max, \ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij} \to \min, \ \sum_{j=1}^{m} x_{ij} = 1, \ i = \overline{1,n} \qquad (3)$$

Полученная задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации, основным методом решения которых являются методы, связанные с получением интегральной оценки, а затем приведение исходной задачи к одной из стандартных задач математического программирования. Но получение комплексной оценки всегда сопряжено с большой степенью субъективности в построении редукции исходной задачи к задаче традиционного математического программирования. Поэтому для лица принимающего решения предпочтительнее было бы получение некоторого, достаточно ограниченного, набора возможных, конкурентоспособных решений из которых затем и можно будет выбирать единственное решение, руководствуясь конкретной ситуацией. В данном случае речь идет о получении множества решений, оптимальных по Парето.

Рассматриваемая задача (3) позволяет получить множество Парето с помощью достаточно простого алгоритма.

Очевидно, что минимальные затраты будут соответствовать случаю, когда все объекты содержатся по самому дешевому варианту. Понятно, что этому варианту будет соответствовать и минимальное значение индекса долговечности, то есть мы получили «антиидеальную» точку с координатами (c_{min}; T_{min}). В том случае если допустить, что все рассматриваемые мостовые сооружения будут содержаться по самому дорогому варианту, то это будет соответствовать и максимальному абсолютному значению индекса долговечности, то есть в данном случае будет найдена точка с координатами (c_{max}; T_{max}) (при этом, что интересно относительные значения в этом случае будут как правило, достаточно низкие, так как срок службы сооружения значительно удлиняется). Это дает возможность найти координаты идеальной точки (c_{min}; T_{max}). В этом случае для нахождения множества Парето – оптимальных решений необходимо решить серию задач целочисленного программирования вида

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} T_{ij}x_{ij} \to \max, \ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij} \le R_k, \ R_k \in [c_{\min}; c_{\max}] \ \sum_{j=1}^{m} x_{ij} = 1, \ i = \overline{1,n} \qquad (4)$$

Осуществляя дискретизацию интервала [c_{min} ; c_{max}] с приемлемой для исходной задачи точностью, получаем серию задач вида (4) решение каждой такой задачи дает одну точку множества Парето.

Но можно получить решение и более простым способом, если воспользоваться методом дихотомического программирования.

В этом случае итоговая таблица решения будет содержать множества решений, по которым можно построить множество Парето – оптимальных решений. Результат такого построения представлен на рис. 2.2.

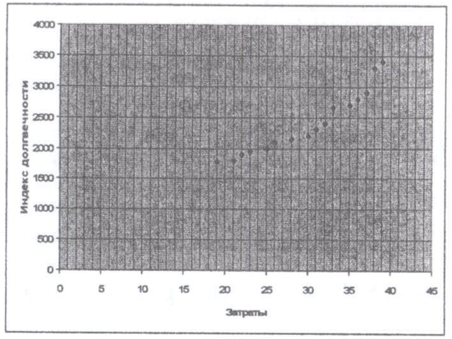

Рис. 2.2 – Результат построения Парето-оптимальных решений

Имея ограниченное множество решений, лицо, принимающее решение, ориентируясь на конкретную ситуацию, может принять обоснованное решение, выбрав из паретовского множества то, которое будет отвечать сложившимся внешним условиям.

Но, все-таки, возникает вопрос о получении единственного решения. Это возможно на основе одного из принципов оптимальности при этом необходимо задаться значимостью каждого критерия. Как известно, значимость критерия определяется весовым коэффициентом, определяемым экспертным путем. Поэтому на этом этапе в решение задачи вносится существенный элемент субъективизма. Рассмотрим применение различных принципов оптимальности при условии равнозначности используемых критериев, то есть будем считать, что в рассматриваемых условиях параметры затрат и долговечности по значимости равны.

Для применения принципов оптимальности необходимо провести нормализацию критериев. Для этой цели используем полную нормализацию, то есть нормализацию будем проводит по формуле

$$\bar{y} = \frac{y - y^{min}}{y^{max} - y^{min}}$$

При этом будем использовать экстремальные значения параметров, найденные по табл. 1. В этом случае имеет $T^{min} = 17, T^{max} = 39, C^{min} = 1700, C^{max} = 3400$.

Наиболее наглядным является принципы идеальной и «антиидеальной» точек. Идея этих принципов достаточно очевидна: находится наилучшая (наихудшая) точка, которая соответствует экстремальным значениям исследуемых критериев, в нашем случае это затраты и индекс долговечности, а затем вычисляются расстояние от каждой точки паретовского множества до идеальной или «антиидеальной» точек. Оптимальным считается то решение, которое имеет минимальное (а в случае «антиидеальной точки максимальное) расстояние.

Нормализованные координаты идеальной точки в нашем случае будут

(0; 1), а «антиидеальной» - (1; 0).

Решение, полученное по принципу идеальной точки, уже рассматривалось выше. А вот решение, полученное по принципу «антиидеальной» точки, достаточно тривиальное: оно показывает на точку, находящуюся в непосредственной близости от точки соответствующей максимальному значению затрат и, следовательно, максимальному индексу долговечности. Больший интерес вызывает вторая точка, которая соответствует минимальныму объему финансирования и минимальному эффекту по отношению к долговременности эксплуатации мостовых сооружений.

Это соответствует реализации первой стратегии содержания мостовых сооружений доставляющая минимальное значение совокупным затратам и минимальное значение индексу долговечности эксплуатации рассматриваемой совокупности мостов.

Следует отметить, что при изменении значимости изучаемых критериев, то есть совокупных затрат и индекса долговечности, решения естественно будут другими.

<u>**В третьей главе**</u> рассматривается комплекс моделей, позволяющих формировать оптимальный план ремонтных работ мостовых сооружений при минимальных значениях ущерба, как на текущий период, так и в процессе перспективного планирования, охватывающего несколько плановых периодов.

Имеются n мостовых сооружений, требующих ремонта. Обозначим q_i – ущерб (ожидаемые потери) в случае, если мост i не будет включен в план ремонта планируемого периода, b_i – затраты на ремонт i-го моста, a_i – ущерб в случае, если мост i включен в план ремонта планируемого периода. Ущерб a_i возникает в силу того, что на время ремонта движение по мосту прекращается. Ущерб q_i включает потери, вызванные ограничениями на эксплуатацию моста, требующего ремонта, а также будущие потери, связанные с ремонтом моста. Как правило $q_i > a_i$. Введем переменные $x_i = 1$, если мост i включен в план ремонта и $x_i = 0$, в противном случае.

<u>Задача 1</u>. Определить $\{ x_i \}$, $i = \overline{1.n}$, минимизирующие

$$\sum_i [a_i x_i + (1 - x_i) q_i] \qquad (5)$$

при ограничении

$$\sum_i x_i b_i \le B \qquad (6)$$

где B – величина средств, выделенных на ремонт мостовых сооружений в планируемом периоде.

Обозначим через $c_i = q_i - a_i$, $i = \overline{1.n}$. Тогда, как легко показать, задача минимизации (5) эквивалентна задаче максимизации

$$C(x) = \sum_i c_i x_i \qquad (7)$$

при ограничении (6). Задача (7), (6) называется «задачей о ранце».

Эффективные алгоритмы ее решения основаны на методах динамического и дихотомического программирования.

Рассмотрим задачу формирования перспективных планов ремонта на несколько периодов. Обозначим $x_{ik}=1$, если ремонт моста i включен в план ремонта k-го периода, $x_{ik}=0$ в противном случае, q_{ik} - ущерб в случае, если ремонт моста i включен в план ремонта k-го периода, b_{ik} - затраты на ремонт моста i, если ремонт производится в периоде k, B_k – величина средств, выделенных на ремонт мостовых сооружений в периоде k.

Возможны два варианта. В первом варианте средства, выделенные в периоде k, могут быть использованы только в этом периоде. Во втором варианте средства неиспользованные в периоде k, можно использовать в более поздних периодах. Соответственно, получаем две задачи оптимизации планов ремонта.

Задача 2. Определить $\{x_{ik}\}$, $i=\overline{1.n}$, $k=\overline{1.T}$ (T – число периодов планирования) минимизирующие

$$Q(x)=\sum_{i,k} q_{ik}x_{ik} \tag{8}$$

при ограничении

$$\sum_i b_{ik}x_{ik} \le B_k,\ k=\overline{1,T} \tag{9}$$

$$\sum_{k=1}^{T} x_{ik}=1 \tag{10}$$

Условия (9) отражают ограниченность средств, выделенных в периоде k, а ограничения (10) отражают условия ремонта любого моста в одном и только одном периоде.

Задача 3. Определить $\{x_{ik}\}$, $i=\overline{1.n}$, $k=\overline{1.T}$ (T – число периодов планирования) минимизирующие (8) при ограничениях (10) и

$$\sum_{s=1}^{k}\sum_{i=1} b_{is}x_{is} \le Q_k, \tag{11}$$

где

$$Q_k=\sum_{s=1}^{k} B_s \tag{12}$$

Ограничения (10) отражают требования ремонта всех мостов за T периодов. Отметим, что даже задача существования допустимого решения в общем случае является сложной задачей дискретной оптимизации.

Рассмотрим задачу 2 для двух периодов. Обозначим $x_{i1}=x_i$, а $x_{i2}=1-x_i$. В этом случае задача принимает вид: минимизировать

$$\sum_i q_{i1}x_i+\sum_i q_{i2}(1-x_i)$$

при ограничениях $\sum b_{ik}x_i \le B_1$, $\sum b_{i2}(1-x_i)\le B_2$. Обозначим $C_i=q_{i2}-q_{i1}$, $i=\overline{1.n}$ $D_2=\sum_i b_{i2}-B_2$,

Нетрудно показать, что задача 2 эквивалентна задаче максимизации

$$\sum_i c_i x_i, \tag{13}$$

при ограничениях

$$\sum_i b_{i1}x_i \le B_1, \tag{14}$$

$$\sum_i b_{i2}x_i \ge D_2, \tag{15}$$

Рассмотрим частный случай, когда $b_{i1}=b_i\cdot t_1$, $b_{i2}=b_i\cdot t_2$, $t_2>t_1$.

В этом случае ограничения (14), (15) принимает вид

$$g=\frac{D_2}{t_2}\le\sum_i b_i\cdot x_i\le\frac{B_1}{t_1}=G.$$

Получаем задачу максимизации (13) при ограничениях

$$g\le\sum_i b_i x_i\le G, \tag{16}$$

Это задача о ранце с двухсторонними ограничениями на общий вес предметов в ранце. Необходимым условием существования решения является, очевидно, **G≥g**. Однако, это условие не является, достаточным.

В общем случае двух периодов получаем задачу целочисленного линейного программирования в переменных 0;1 с двумя ограничениями.

Применим метод сетевого программирования. Сформируем оценочную задачу. Она представляет собой совокупность двух задач о ранце. Разделим C_i на две части

$$C_i=C_{i1}+C_{i2}.$$

Первая оценочная задача заключается в максимизации

$$\sum_i C_{i1}x_i,$$

при ограничении (14),
а вторая в максимизации

$$\sum_i C_{i2}x_i,$$

при ограничении (15).

Возьмем $C_{i2}=-b_2$. В этом случае вторая оценочная задача сведется к минимизации

$$\sum_i b_{i2}x_i, \tag{17}$$

при ограничении (15).

Обозначим $A_1(C_1)$ значение целевой функции в оптимальном решении первой оценочной задачи, а $A_2(C_2)$ – второй, тогда верхняя оценка целевой функции оптимального решения исходной задачи будет равна

$$A(C)=A_1(C_1)-A_2(C_2)$$

Описанный метод получения верхних оценок служит основой для метода ветвей и границ.

1 шаг. Решаем первую оценочную задачу о ранце. Если полученное решение является оптимальным решением для второй задачи, то оно является оптимальным для исходной задачи. В противном случае переходим к шагу 2.

__2 шаг.__ Выбираем одну из переменных i (рекомендуется выбрать переменную, которой соответствует максимум отношений C_{i1}/b_{i1}). Рассматриваем два подмножества решений. В первом подмножестве $x_i=1$, а во втором - $x_i=0$. Получаем верхние оценки для целевых функций подмножеств решая первую и вторую оценочные задачи. Выбираем подмножество с максимальной оценкой. Далее действуем согласно стандартной процедуре метода ветвей и границ, то есть выбранное подмножество делим на два, оцениваем их, выбираем из всех полученных подмножеств то, которое имеет наибольшую верхнюю оценку и т.д., пока не получим решение исходной задачи, значение целевой функции которого не меньше, чем верхние оценки остальных подмножеств.

Рассмотрим случай, когда средства неиспользованные в первом периоде, можно использовать во втором. В этом случае ограничения (14) останется, а ограничение (15) заменяется на другое

$$\sum_i x_i b_{i1} + \sum_i (1-x_i) b_{i2} \le B_1 + B_2,$$

которое после несложных преобразований принимает вид

$$\sum_i (b_{i2} - b_{i1}) x_i \ge \sum_i b_{i2} - (B_1 + B_2). \tag{18}$$

Задача решается на основе метода ветвей и границ с получением верхних оценок на основе метода сетевого программирования, как и в случае предыдущей задачи.

В случае трех периодов задача по аналогии с случаем двух периодов может быть представлена в виде задачи целочисленного линейного программирования. Для этого обозначим $x_{ik}=1$, если ремонт i–го моста включен в план ремонта **k** – го периода и $x_{ik}=0$, в противном случае.

Если передача средств, неиспользованных в k–ом периоде, в более поздние периоды запрещена, то получаем задачу 1.

Задача 1. Определить $\{x_{ik}\}, i=\overline{1,n}\; k=1,2,3,$ минимизирующие

$$A(x) = \sum_{k=1}^{3} \sum_{i=1}^{n} q_{ik} x_{ik}, \tag{19}$$

при ограничениях

$$\sum_{k=1}^{3} x_{ik} = 1, \tag{20}$$

$$\sum_{i=1}^{n} b_{ik} x_{ik} \le R_k, \tag{21}$$

Ограничение (20) означает, что каждый мост включается в план одного и только одного периода.

Если средства, неиспользованные в данном периоде, можно использовать в последующих периодах, то получаем задачу 2.

Задача 2. Определить $\{x_{ik}\}, i=\overline{1,n}\; k=1,2,3,$, минимизирующие (19) при ограничениях (20) и

$$\sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} b_{ij} x_{ij} \le Q_k, \tag{22}$$

Рассмотрим несколько частных случаев задачи. Начнем с задачи 2. Примем, что

$$q_{ik} = q_i \cdot p_k,\; i=\overline{1,n}\; k=1,2,3,\; b_{ik} = b_i \quad \textbf{для} \quad \textbf{всех} \quad i,k$$

Необходимым и достаточным условием существования решения задачи является $\sum_i b_i \le Q_3$. Рассмотрим следующие две задачи о ранце.

Первая задача о ранце: определить $x_i = 0;1$, $i=\overline{1,n}$, максимизирующие

$$\sum_{i=1}^{n} x_i q_i, \tag{23}$$

при ограничении

$$\sum_{i=1}^{n} x_i b_i \le Q_1, \tag{24}$$

Вторая задача о ранце: определить $x_i = 0;1$, $i=\overline{1,n}$, максимизирующие (23) при ограничении

$$\sum_{i=1}^{n} x_i b_i \le Q_2, \tag{25}$$

Обозначим $\mathbf{W_1}$ – множество $x_i=1$ в первой задаче, $\mathbf{W_2}$ – множество $x_i=1$ во второй задаче. Соответственно

$$A(W_1) = \sum_{i\in w_1} q_i$$

$$A(W_2) = \sum_{i\in w_2} q_i$$

__Теорема 1__. Величина

$$A = p_1 A(W_1) + p_2 (A(W_2) - A(W_1)) + p_3 \left(\sum_i q_i - A(W_2) \right).$$

Является оценкой снизу минимальных потерь для исходной задачи.

__Следствие 1__. Пусть имеет место $W_1 \subset W_2$. В этом случае план, в котором в первом периоде ремонтируются мосты множества $\mathbf{W_1}$, во втором – множества $\mathbf{W_2/W_1}$, а в третьем – все остальные, является оптимальным.

Обобщим описанный подход на случай, когда затраты также изменяются от периода к периоду, то сеть

$$b_{ij}=b_i \cdot d_j.$$

Первая задача о ранце почти совпадает с задачей (23), (24):

Определить $x_i=0,1$, $i=\overline{1,n}$, максимизирующие

$$\sum_i x_i q_i \tag{26}$$

при ограничении

$$\sum_i x_i b_i \le \frac{Q_1}{d_1} \tag{27}$$

По-прежнему, обозначим, $\mathbf{W_1}$ – решение первой задачи (множество переменных $x_i=1$), $\mathbf{A(W_1)}$ – величину (26) в этом решении.

Для оценки $\mathbf{A(W_2)}$ построим следующим образом. Обозначим $\mathbf{0 \le z_1 \le Q_1}$, количество средств, расходуемых в первом периоде, $\mathbf{D_1(z_1)}$ – значение целевой функции в оптимальном решении задачи (26), (27), где $Q_1=z_1$. Значение целевой функции в оптимальном решении задачи (26), (27), где в правой части неравенства (27) стоит $\frac{\mathbf{Q_2 - z_1}}{\mathbf{d_2}}$ Определим

$$\mathbf{A(W_2) = \max_{z_1}[D_1(z_1) + D_2(z_1)]} \qquad (28)$$

где W_2 – оптимальное решение задачи (26), (27) при величине z_1, при которой достигается максимум в (28).

Покажем, что $\mathbf{A(W_2)}$, по-прежнему является оценкой сверху суммарного ущерба в двух периодах планирования. Действительно, оптимальному решению задачи соответствует некоторая величина $\mathbf{z_1}$.Поэтому ущерб в первом периоде составит не менее $\mathbf{D_1(z_1)}$, а во втором – не менее $\mathbf{D_2(z_1)}$. Очевидно, что (28) дает верхнюю оценку суммарного ущерба без учета дисконтирующих множителей $\mathbf{p_k}$. Теперь можно получить нижнюю оценку целевой функции исходной задачи.

<u>Лемма.</u> Если $\mathbf{W_1 \cap W_2 = \varnothing}$, то полученное решение, в котором в первом периоде ремонтируется множество мостов $\mathbf{W_1}$, во втором множество мостов - $\mathbf{W_2}$, а в третьем – все остальные, является оптимальным решением исходной задачи.

В основе описываемого ниже приближенного алгоритма решения задачи лежит следующее допущение.

Допущение. Пусть получено решение, в котором в первом периоде расход средств составляет $\mathbf{0 \le z_1 \le R_1}$.

Тогда множество мостов, ремонтируемых в первом периоде определяется из решения следующей задачи: максимизировать

$$\sum_i \mathbf{q_i x_i} \qquad (29)$$

при ограничении

$$\sum_i \mathbf{q_i x_i} \qquad (30)$$

Если принять это допущение, то алгоритм заключается в переборе всех значений $\mathbf{z_1}$. Для каждого $\mathbf{z_1}$ определяется множество $\mathbf{W_1(z_1)}$ мостов, ремонтируемых в первом периоде (в результате решения задачи (29), (30)). Множество мостов $\mathbf{W_2(z_1)}$ ремонтируемых во втором периоде для каждого $\mathbf{z_1}$ определяется в результате решения следующей задачи:
максимизировать

$$\sum_{i \notin W_1(z_1)} \mathbf{q_i x_i} \qquad (31)$$

при ограничении

$$\sum_{i \notin W_1(z_1)} \mathbf{b_i x_i} \le \frac{\mathbf{Q_2 - z_1}}{\mathbf{d_2}} \qquad (32)$$

Из полученных решений выбирается лучшее.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Перечислим основные результаты работы:

1. Проанализирован состав парка мостовых сооружений и определены тенденции развития системы эксплуатации мостов.
2. Определены основные варианты содержания мостовых сооружений и затраты, соответствующие каждому варианту.
3. Разработана модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов.
4. Определено множество Парето-оптимальных решений, обеспечивающих эффективное формирование стратегии по содержанию мостовых сооружений по критериям долговечности и величины совокупных затрат.
5. Построена модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба.
6. Разработана модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов.
7. Получена нижняя оценка решения для задачи минимизации ущерба при нескольких периодах планирования.
8. Построен приближенный алгоритм решения задачи формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Лихотин Ю.П., Косенков К.В., Матвеев И.К. Механизмы распределения ресурсов сосредоточенных работ. В кн. Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий. Материалы международной конференции и российской научной школы. Москва-Сочи, Радио и связь, 2004г. – с. 174 – 177. (Лично автором выполнено 2 с.)
2. Лихотин Ю.П., Косенков К.В., Матвеев И.К. Классификация рассредоточенных работ. В кн. Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий. Материалы международной конференции и российской научной школы. Москва-Сочи, Радио и связь, 2004г. – с. 171-174. (Лично автором выполнено 2 с.)
3. Богданов Д.А., Протопопов О.И., Левдиков В.И., Матвеев И.К Модели прогнозирования для поддержки принятия стратегических решений В кн. Прикладные задачи моделирования и оптимизации. Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж, ВГТУ, 2004г. С. 62-71. (Лично автором выполнено 4 с.)
4. Кодратьев В.Д., Матвеев И.К., Невгод В.Г. Оптимальное размещение объектов обслуживания. Теория активных систем Труды международной научно-практической конференции (16-18 ноября 2005г., Москва, Россия) С. 135. (Лично автором выполнено 0,5 с.)
5. Баркалов П.С., Матвеев И.К. Определение оптимальной очередности при линейном расположении объектов строительства. В кн. Современные