

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Южно-Уральский государственный университет  
Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра информационно-аналитического обеспечения управления  
в социальных и экономических системах

С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Я.Д. Гельруд, А.В. Голлай,  
О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков

## **УМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ**

Учебное пособие

Под редакцией члена-корреспондента РАН Д.А. Новикова

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2019

УДК 005.8 (075.8)  
У546

*Рецензенты:*  
*доктор технических наук, профессор,*  
*заслуженный деятель науки РФ Г.Г. Куликов*  
*доктор технических наук, профессор А.В. Мельников*

*Авторский коллектив:*  
С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Я.Д. Гельруд,  
А.В. Голлай, О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков

У546 **Умное управление проектами:** учебное пособие / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Я.Д. Гельруд и др.; под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – 189 с.

ISBN 978-5-696-05051-5

Учебное пособие посвящено вопросам управления сложными проектами с использованием умных механизмов, методов и математических моделей, разрабатываемых и внедряемых авторами в течение многих лет. Наглядно показан процесс адаптации существующих и разработки актуальных методов и моделей проектного управления.

Представленные в книге механизмы, методы и математические модели позволяют комплексно подойти к созданию системы управления проектами, обеспечивающими принятие решений, на всех уровнях организационного управления, включая различные заинтересованные стороны.

Предназначено для студентов и аспирантов, обучающихся по направлениям группы специальностей: информатика, управление и вычислительная техника.

УДК 005.8 (075.8)

ISBN 978-5-696-05051-5

© Издательский центр ЮУрГУ, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Механизмы, методы и модели управления проектами предназначаются для планирования, разработки и создания проектов крупных народно-хозяйственных комплексов, а также могут быть использованы в процессах конструкторской и технологической подготовки производства, освоения новых видов изделий, строительстве и реконструкции зданий и сооружений, в ходе самых разнообразных научных исследований, связанных с проектной деятельностью, и др.

Возникновение проектного управления базировалось изначально на использовании так называемых сетевых моделей или графиков.

Сетевое моделирование позволяло:

- формировать календарный план реализации некоторого комплекса работ, направленных в совокупности на достижение конкретной цели;
- осуществлять управление всем комплексом работ с прогнозированием и предупреждением возможных срывов в ходе их реализации;
- выявлять и мобилизовывать резервы времени, трудовые, материальные и денежные ресурсы;
- повышать эффективность управления проектов в целом при четком распределении ответственности между руководителями разных уровней и исполнителями работ.

При этом диапазон применения методов сетевого моделирования был весьма широк: от задач, касающихся выполнения весьма несложного перечня работ, до масштабных проектов, в которых участвуют сотни организаций и десятки тысяч работников.

Важной особенностью проектного управления является и то, что множество организаций, участвующих в создании проекта, имеют существенно различное отношение к проекту, т.е. заинтересованы в его выполнении с различных сторон. В англоязычной терминологии они, как известно, называются стейкхолдерами.

Каждый из стейкхолдеров может иметь свою команду управления проектом во главе со своим руководителем, наделенным соответствующими полномочиями и представляющим в проекте интересы данной стороны.

Выбор методов и средств управления проектами в значительной мере определяется тем, какая из заинтересованных сторон проекта рассматривается в качестве субъекта управления проектной деятельностью в каждом конкретном случае.

С конца 1990-х годов стала успешно развиваться теория активных систем, которая оказала существенное влияние на развитие идей проектного управления. За годы своего развития в теории активных систем были разработаны, исследованы и внедрены множество эффективных механизмов, методов и моделей управления. Они нашли применение при решении ши-

рокого круга задач управления в экономике и обществе – от управления технологическими процессами до принятия решений по социально-экономическому и технологическому развитию различных промышленных корпораций, регионов и государств.

Проектное управление в своем развитии обогащалось не только теоретическими исследованиями ученых, работающих в области управленческих наук, но и результатами практического опыта создания крупномасштабных и специфических уникальных проектов самого различного характера. В результате теория проектного управления стала важной самостоятельной научной дисциплиной, нашедшей широкое воплощение в научно-хозяйственной деятельности.

Авторами данного учебного пособия сделана попытка показать не только эволюционное развитие идей проектного управления и особенности его современного этапа, но и раскрыть сущность и преимущества использования умных механизмов управления проектами, в том числе с учетом интересов отдельных стейкхолдеров.

В этой связи в части 1 учебного пособия представлена историческая ретроспектива развития управления проектами, подробно описаны достоинства и недостатки используемых на практике сетевых моделей и алгоритмов, а также стандарты управления проектами используемые в мировой практике.

В части 2 учебного пособия приведены механизмы умного управления проектами, основанные на использовании теории активных систем.

В части 3 выполнено структурирование особенностей ключевых стейкхолдеров и с их учетом описаны математические модели проектного управления для инвестора, заказчика, команды проекта, основных исполнителей, поставщиков, регулирующих органов и коммерческой службы.

В части 4 рассматриваются методы гибкого управления проектами, нашедшие широкое применение в управлении, направленном на разработку новых продуктов. Приводятся методы масштабирования систем управления, позволяющие управлять крупными проектами.

Каждая часть сопровождается собственным библиографическим списком, в котором приведены наиболее важные библиографические источники по рассматриваемым в главе вопросам.

Сведения об авторах приведены в конце книги.

# ЧАСТЬ 1. ИСТОРИЧЕСКАЯ РЕТРОСПЕКТИВА, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

## Глава 1.1. Эволюция методов описания проектов

Эволюция методов проектного управления имеет значительную историю.

Первые малоуспешные попытки оптимизации календарных планов производства математическими средствами имели место еще в 1911 году. Но лишь в 1925 году была опубликована работа Ф.Г. Гарриса, определяющая оптимальную периодичность запуска изделий в производство. Затем на протяжении почти тридцати лет прогресс в рассматриваемой области был ничтожен, формула Ф.Г. Гарриса обросла усложнениями, которые впоследствии отпали. Лишь к началу 1950-х годов, когда к разработке методов «исследования операций» в экономике уже были привлечены многочисленные математики, а повсеместное распространение компьютерной техники многократно увеличило вычислительные возможности, исследовательская работа по оптимизации календарных планов стала осуществляться более широким фронтом. Наряду с оригинальными решениями (задача Джонсона) и классическими приемами анализа были привлечены такие эффективные математические средства, как линейное и нелинейное программирование, статистическое моделирование с применением процедуры Монте-Карло, теория массового обслуживания, динамическое и стохастическое программирование [9, 13].

Упомянутые выше подходы в основном относились к проблеме календарного планирования массового производства изделий, каждое из которых требовало выполнения сравнительно небольшого количества операций, производимых на оборудовании определенного вида.

Создание сложных единичных объектов, требующих реализации большого количества операций со сложными технологическими взаимозависимостями между ними, обусловило необходимость использования качественно новых моделей и методов управления подобными процессами. Это направление научных исследований и их практического приложения лежит в основе современных концепций управления, называемых «управление проектами» (project management).

Разработка современных методов проектного управления началась в конце 1950-х годов XX века с появлением работ по сетевому моделированию, названных классическими сетевыми моделями [17]. Первые системы управления проектами, использующие сетевые модели (PERT, CPM), базировались на разработанном и описанном в вышеуказанной литературе «методе критического пути» (CPM – Critical-Path Method) – простом, но

весьма действенном методе планирования и календарного распределения операций при выполнении проектов различной сложности. Этот метод позволяет ранжировать все работы по степени их влияния на общую продолжительность выполнения проекта с выделением, так называемых критических работ и их последовательностей (критических путей).

Упорядоченная таким образом информация дает удобную основу для принятия решений на этапе планирования по «приведению критического пути к заданному сроку», а также при контроле за ходом реализации проекта – концентрировать внимание проект-менеджера на «узких местах», т.е. тех «критических» и «подкритических» зонах, от которых в наибольшей степени зависит выполнение всего проекта (или отдельных его частей) в заданный срок. Это метод целенаправленного управления (цель – выполнить проект в заданный срок). При этом формализация задачи на оптимум не производится.

Следующим этапом развития сетевого моделирования и методов принятия решений были постановки оптимизационных задач: минимизация стоимости проекта (PERT–COST), а также задачи оптимального распределения ресурсов [1, 6, 15]. В основе этих разработок лежал понятийный и языковой аппарат классических сетевых моделей.

В конце 1960-х годов были разработаны обобщенные сетевые модели [4, 10], принципиальным отличием которых появилась возможность задавать значительно более широкий спектр технологических связей, чем это позволяют классические модели, причем технологически зависимыми событиями могут выступать не только сроки начала и сроки окончания работ, что присуще классическим сетевым моделям, но и сроки любых промежуточных состояний работы (операции). Большим достижением разработчиков обобщенной сетевой модели явилось сведение ее к расчетному виду, принятому в традиционной сетевой модели, что позволило использовать накопленный к тому времени богатый арсенал алгоритмических средств. Обобщенные сетевые модели дали возможность более адекватно описывать технологические процессы в ходе управления сложным проектом по сравнению с классическими сетевыми моделями, при этом появилась возможность существенно укрупнять объект, не теряя значимость и достоверность информации. Таким образом, была обеспечена возможность описывать различные иерархические структуры: организационную структуру управления, структуру проекта, структуру ресурсов, структуру процессов, когда разрешалось пользоваться различными единицами измерения ресурсов и времени. Особое значение обобщенные модели имеют для оптимизации планов при различных критериях, связанных с соблюдением специальных организационных и технологических требований, обеспечивающих заданный период времени между некоторыми парами состояний работ. Это могут быть требования, задающие условия непрерывности выполнения работ на данном проекте, абсолютные ограничения

на сроки выполнения некоторых работ, ограничение или непрерывность перерывов между отдельными работами, и т.д.

В это же время были разработаны вероятностные сетевые модели и соответствующие статистические методы для формирования календарного плана на базе классических сетевых моделей, учитывающих вероятностный характер параметров проекта.

Следует заметить, что и первые традиционные сетевые модели (PERT) учитывали вероятностный характер продолжительности работ, при этом формировались детерминированные модели посредством использования в них математических ожиданий (средних) продолжительностей работ. На первый взгляд это вполне естественный путь решения вероятностных задач – заменить случайные параметры их средними значениями и вычислять оптимальные планы на полученной таким образом детерминированной модели, но он не всегда дает приемлемое решение. При усреднении параметров нарушается адекватность изучаемого объекта управлению построенной модели. Решение детерминированной задачи со средними параметрами часто не удовлетворяет условиям исходной задачи при изменяющихся параметрах ограничений. Поэтому использование вероятностных сетевых моделей предполагает поиск такого решения, чтобы оно попадало в допустимую область с вероятностью, превышающей некоторое заданное заранее число  $\alpha > 0$  ( $\alpha$  может представлять собой вектор доверительных интервалов в случае, когда допустимые невязки в разных ограничениях вызывают различный ущерб).

Следующий этап развития моделей и методов управления проектами – стохастические сетевые модели. Они позволяют отражать как широкий спектр весьма сложных связей между работами и событиями, так и многоальтернативный характер ветвящихся направлений выполнения проекта. При этом учитываются случайные воздействия, обстоятельства и помехи [5, 7, 10, 15]. Стохастическая сетевая модель позволяет решить одну из наиболее сложных задач прогнозирования – определение направлений разработки сложного проекта с оценкой вероятности реализации каждого направления и сроков его реализации.

Необходимо отметить, что до настоящего времени широкое практическое применение нашли только методы детерминированного сетевого моделирования, некоторые эвристические методы оптимального распределения ресурсов и параметрические методы расчета затрат (в основном, в сфере воздушных и космических полетов). Хотя точное решение стоимостных задач календарного планирования, использующих классические сетевые модели, теоретически найдено, но на практике его использование связано с трудоемкостью получения фактических данных о связях «время-стоимость».

Каждая упомянутая выше модель имеет свою область применения, по своему реализует базовые функции проектного управления, но только

синтез рассмотренных моделей и методов позволяет сформировать модель, адекватно отражающую реализацию сложного проекта в условиях неопределенности, получая при этом приемлемое в практическом отношении решение сформулированной задачи.

Настоящее время характеризуется несоответствием традиционных методологических подходов к управлению проектами и их инструментария комплексности (сложности) мира и динамики его изменений [2].

Кроме комплексности и нелинейности внешней среды, в которой выполняются сегодня проекты, существует множество факторов, понижающих эффективность проектного управления, поэтому необходимо выделить из них главные и найти способы уменьшения их влияния.

Одной из основных причин неуспешной реализации проектов является то, что верхние субъекты управления почти не участвуют в этой деятельности, современные технологии и методологии управления проектами не учитывают в полной мере их интересы. Необходимо менять привычный набор фундаментальных научных установок проектного управления – заменить рассмотрение управления «снизу вверх» на взгляд «сверху вниз».

В процессе реализации сложных масштабных проектов и управлении ими, как правило, участвуют одновременно различные заинтересованные стороны (стейкхолдеры), которые могут отличаться разными ролями, ожиданиями, действиями и мерой ответственности. И хотя при реализации проекта они являются партнерами, обеспечивающими общий результат, тем не менее, они могут иметь отличающиеся друг от друга цели, критерии оценки и стратегии их достижения. Указанные различия влияют на постановку соответствующих управленческих задач, используемые методы, средства и технологии их решения [6].

## **Глава 1.2. Особенности и современные проблемы управления проектами**

### *Особенности концепции управления проектами*

В современных системах управления сложными проектами задачи календарного планирования занимают центральное место. В результате решения этих задач формируются оптимальные планы реализации проектов. По классификации, предложенной в [3], задачи календарного планирования реализуют одну из основных функций управления проектом – управление временем. Эта функция включает в себя нахождение (прогнозирование) сроков начала и окончания проекта, его отдельных частей, важнейших событий и всех выполняемых работ; рациональное использование резервов времени; оптимизацию временных характеристик; контроль развития проекта; принятие управленческих решений по ликвидации отклонений от плановых сроков выполнения отдельных работ, частей проекта и сроков выполнения проекта в целом.



Календарный план выполнения работ проекта определяет распределение по времени всех ресурсов и является управленческой основой не только для производства работ, но и управления обеспечивающими процессами: финансированием проекта, материально-техническим снабжением, обеспечением трудовыми ресурсами, машинами и механизмами и т.п.

Календарное планирование работ осуществляется с учетом ресурсных ограничений, учитывающих динамику их потребления. Его можно трактовать не только как формирование расписания работ проекта, но и как календарное планирование потребности в ресурсах.

Объектом управления здесь является процесс реализации проекта, представляющего собой сложную техническую, организационно-экономическую динамическую систему в условиях непрерывных воздействий внутренней и внешней среды.

Содержательные аспекты задач управления проектами с присущими им характеристиками, требуют соответствующего учета в связи с внешними воздействиями среды.

Эти характеристики могут быть сведены в группы, соответствующие различным аспектам объекта моделирования (т.е. объектов, для которых осуществляется проектное управление): экономическим, организационным, технологическим, стохастическим.

#### *Экономические аспекты объекта моделирования*

Задача определения стоимости проекта возникает на разных стадиях от оценки (прогнозирование стоимости) нового проекта до окончания работ (контроль расходования выделенных средств) [2, 14].

Определение затрат и динамики потребления финансовых ресурсов имеют важное значение в управлении проектом. При этом существенным аспектом является зависимость динамики потребности в денежных ресурсах от календарного плана работ и возможных способов оплаты (равномерная оплата, предоплата, оплата по выполнению комплекса работ или всего проекта в целом).

#### *Организационные аспекты объекта моделирования*

Многоуровневая организационная структура внутренней и внешней среды проекта непосредственно связана с каждым этапом его реализации от формирования первоначального плана до завершения всех работ проекта.

Важнейшим организационным аспектом является задача распределения ресурсов, которые находятся, как правило, в «общем котле» и необходимы для выполнения разных работ одного или некоторых проектов.

Суммарная потребность в некоторых ресурсах в отдельные моменты времени по первоначальному плану может превышать их наличие. В этих условиях необходимо корректировать интенсивность потребления ресурсов или сроки выполнения работ, что приводит к неустойчивости плана.

Поэтому при разработке плана следует заранее учитывать ограниченность ресурсов и динамику их потребления, которые могут существенно отличаться друг от друга для различных ресурсов (равномерно и синхронно или с некоторым временным опережением; порционно и т.д.).

Сложные задачи учета ресурсов при календарном планировании возникают в случае параллельной разработки нескольких проектов (мультипроектировании), использующих общий резервуар ресурсов.

К организационным аспектам также относится необходимость фиксации сроков свершения некоторых контрольных событий сетевой модели. К примеру, событие, являющееся пуском отопительной системы объекта, должно завершиться до наступления заморозков, иначе дальнейшие работы по отделке объекта не могут быть начаты. При создании плотины перекрытие реки должно завершиться до периода дождей и т.п.

#### *Технологические аспекты объекта моделирования*

Технологические связи (зависимости) между работами проекта могут иметь сложную природу и включать в себя:

- непрерывность и поточность выполнения работ;
- частичное или полное их совмещение во времени;
- разные отношения предшествования работ («не позднее», «не ранее»);
- технологические перерывы выполнения работ (или их частей) и т.п.

Помимо этого, при выполнении проекта могут задаваться внешние и внутренние, явные и неявные цели проекта (в соответствии с классификацией). Выполнение работ может также производиться с переменной интенсивностью.

#### *Стохастические аспекты объекта моделирования*

Вероятностный характер процесса реализации проекта определяет многие его параметры в виде случайных величин (случайными величинами могут быть не только продолжительности работ, но и само наличие в модели работы, т.е. реализация отдельной работы может быть осуществлена с вероятностью  $p \neq 1$ ).

Случайные величины могут подчиняться различным законам распределения, при этом тип распределения для различных параметров может быть разным. Например, сроки окончания работ могут распределяться по нормальному закону, а стоимости и продолжительности работ по бета-распределению.

Одним из главных аспектов процесса управления сложным проектом является неопределенность в способах его реализации. То есть в проекте могут присутствовать промежуточные (альтернативные) события, после которых необходимо принимать решение, каким из возможных путей продолжать реализацию проекта, чтобы оптимальным образом достичь

цели. Все выходы из альтернативных событий происходят с некоторыми вероятностями, равными в сумме единице [2, 6, 15].

*Общий обзор критериев эффективности  
и областей их целесообразного применения*

Каждый проект может иметь множество взаимосвязанных целей, соответствующих структуре проекта (включая участников). Степень достижения целей проекта определяется выбором соответствующих критериев оптимальности календарного плана. Эти критерии позволяют оценить альтернативные решения достижения целей проекта.

В данной главе выделены основные параметры модели, связи и ограничения, представляющиеся необходимыми и достаточными исходя из сформированных ниже критериев оптимальности. Вследствие разнообразия производственных условий может быть определено очень большое число вариантов постановок задач формирования календарного плана процесса выполнения сложного проекта.

Критерии оптимальности разделим на две группы, зависящие от наличия или отсутствия директивных сроков завершения проекта или его отдельных работ.

Первая группа содержит критерии, обеспечивающие соответствие сроков реализации работ директивно заданным срокам:

- минимизация среднего, либо суммарного, либо максимального отставания от директивных сроков;
- оптимизация выбранного показателя качества ресурсного плана (неравномерность их потребления; затраты, связанные с излишками или дефицитом основных ресурсов);
- минимизация затрат, связанных с невыполнением некоторых работ в срок (материальный ущерб от ухудшения репутации фирмы, штрафы и пени за несвоевременную поставку изделий, потери от простоев станков или оборудования, транспортные расходы, обеспечивающие срочную доставку запаздывающих изделий и т.п.);
- минимизация количества отстающих работ и т.д.

Вторая группа критериев формулируется при отсутствии директивных сроков выполнения проекта. Они используют, как правило, общую продолжительность процесса выполнения проекта:

- минимизация продолжительности жизненного цикла;
- максимизация степени использования оборудования;
- минимизация простоев исполнителей;
- оптимизация затрат, связанных с незавершенным производством;
- минимизация сроков реализации контролируемых и оплачиваемых заказчиком этапов работ;
- оптимизация затрат, связанных с переналадкой оборудования и т. д.

Вместе с перечисленными выше критериями применяются иногда и такие, как среднее число проектов в производстве, усредненная длительность ожидания в очереди и т.п. Встречаются совсем уж специальные критерии, к примеру, в условиях свертывания производства, ищется минимум продолжительности ликвидационного промежутка, в котором завершается выполнение всех проектов и трудовые ресурсы и оборудование освобождаются для иных использований.

Критерием оптимальности может служить объем затрат на содержание запасов, на предпроектную подготовку, на нормальную и сверхурочную заработную плату, потери из-за дефицита, причем используются при этом *дисконтированные затраты*, приведенные к началу планового периода.

Приведенные выше критерии относятся к проблеме календарного планирования в любом производстве. При управлении проектами обычно имеются директивные сроки завершения проекта и информация о затратах на его реализацию.

При дальнейшем описании моделей оптимизации процесса реализации проекта мы приведем конкретный функциональный вид необходимых критериев оптимальности, обеспечивающих выполнение перечисленных выше условий.

#### *Универсальные сетевые модели, использующие нечеткую логику*

Успешное применение математических методов для анализа сложных проектов в условиях неопределенности требует создания адекватных средств учета нечетких суждений людей при моделировании. В этой связи предлагается использовать соответствующее направление в прикладной математике, разработанное видным американским математиком Л.А. Заде [8] и названная теория нечетких множеств. В настоящее время работы, посвященные этой теории и ее приложениям, исчисляются сотнями. В ее основе лежит понятие нечеткого (размытого) множества, являющегося математической моделью класса элементов с нечеткими границами. Элемент может иметь степень (вероятность  $\mu$ ) принадлежности множеству между полной принадлежностью ( $\mu = 1$ ) и полной непринадлежностью ( $\mu = 0$ ).

В данной главе анализируются математические модели управления проектом, в которых информация описывается в терминах нечетких множеств по теории Л.А. Заде. Использование данного математического аппарата позволяет сузить множество возможных альтернатив, выбрав более приемлемые варианты (альтернативы).

Определения теории нечетких множеств, операции над ними и их свойства – достаточно подробно изложены в работе Л. А. Заде [8] и во множестве работ его последователей. В данной главе мы будем использовать эти понятия для анализа задач управления проектами.

Теорию нечетких множеств успешно применяли в технических системах, используя эвристические правила, установленные человеком-оператором. Были получены успешные результаты применительно к тех-

нологическим процессам. Нечеткие множества были использованы для построения модели, воспроизводящей организационное поведение. В работах [11, 12] теория нечетких множеств использована для финансово-экономического анализа предприятия, для расчета экономической эффективности инвестиционного проекта, при моделировании и анализе антикризисных ситуаций. Эти различные исследования показали, что приближенные рассуждения можно моделировать и получать при этом весьма эффективные решения.

#### *Использование нечетких множеств в сетевых моделях*

Нечеткие условные высказывания, которыми оперирует человек для определения характеристик сетевой модели, дают методологию для представления утверждений вида «Если будет погода *хорошая*, то продолжительность работы будет *не большая*». Термины *хорошая* и *не большая* являются значениями лингвистических переменных «тип погоды» и «продолжительность работы». Так как руководитель зачастую оперирует нечеткими понятиями, эвристическая модель, использующая лингвистические переменные, дает адекватную познавательную имитацию.

В качестве решения (значение некоторого параметра сетевой модели) выбирается одно значение, т.е. нечеткое подмножество необходимо преобразовать в скаляр. В соответствии с [8] логическим критерием выбора является выбор такого значения базовой переменной, которое максимизирует функцию принадлежности. Этот критерий успешно использовался в прикладных исследованиях.

Определение характеристик сетевой модели заключается в использовании ряда утверждений о значениях логических высказываний, характеристики модели при этом вычисляются по формулам из [8].

Чтобы алгоритм определения характеристик сделать рабочим, его наполняют утверждениями относительного назначения. При этом требуется:

- 1) подобрать лингвистические переменные и их значения для утверждений назначения;
- 2) включить необходимое и достаточное количество утверждений относительного назначения для обеспечения адекватности модели исследуемой проблеме.

Рассмотрим задачу моделирования продолжительности работы – ПР. Лингвистические переменные ( $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5$ ) – факторы, влияющие на определяемую характеристику, могут быть различные для разных проектов. Это может быть погода, обеспеченность ресурсами, объем финансирования, сложность местности, степень экологического риска, соответствие квалификации исполнителей сложности проекта и пр.

Сначала определяются нечеткие подмножества для ПР и всех лингвистических переменных  $\Phi_i$ . Каждый интервал их возможных значений разбиваем на 7 диапазонов, каждый из которых определяет нечеткое подмножество: очень большой, большой, выше среднего, средний, ниже среднего,

маленький, очень маленький. Треугольные функции принадлежности, несмотря на их привлекательную простоту, были отвергнуты из-за неадекватности статистической информации. Подход, принятый в данной главе, аналогичен подходу из [12]. В этой работе были использованы экспоненциальные функции, здесь они и определяемые ими нечеткие подмножества мы переобозначили, чтобы их смысл более адекватно согласовывался с базовыми переменными.

В табл. 1.2.1 даны функции принадлежности лингвистических термов, использованных в рассматриваемом случае. Базовая переменная  $x$  (графа 3) – это любая из следующих переменных:  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5$  и  $PP$ .

Важное свойство экспоненциальных функций из [12] заключается в том, что переменные определены в интервале  $[-1, 1]$ , поэтому предварительно их значения соответствующим образом нормируются. Поэтому одни и те же лингвистические термы служат для описания разных базовых переменных.

Чтобы получить управляющие правила, образующие основу нечетких алгоритмов при определении продолжительности работ, требуется производить комбинацию различных условий требований с допустимыми значениями прогнозируемых показателей и определяющих переменных. При этом используется вся информация о ранее выполненных подобных проектах или проектах соответствующего типа. Помимо этого, некоторые значения переменной  $PP$  могут приниматься экспертами.

Алгоритмические правила для определения  $PP$  даны в таблице 1.2.2. Эти производственные правила представляют собой утверждения относительного назначения по формулам из [8].

Полученные управляющие решения возможно не оптимальны, но они разумны, обоснованы уровнем компетенции экспертов и имеющейся информацией.

Чтобы применять нечеткие алгоритмы, сначала параметризуются модельные переменные, т.е. описываются универсумы, из которых выбираются значения лингвистических переменных. Для каждой переменной определяются два параметра – ожидаемая верхняя и нижняя границы. Верхняя граница соответствует значению  $+1$ , которое используется при определении нечетких подмножеств в табл. 1.2.1, соответственно нижняя граница соответствует значению  $-1$ .

В данной главе была представлена модель, воспроизводящая способность руководителя к приближенным рассуждениям при производственном прогнозировании. Результаты использования модели нечеткого алгоритма свидетельствуют о возможности руководителя выполнить данную работу очень хорошо. Следует отметить также нерасположение руководителей применять математически усложненные модели обобщенного планирования, требующие учета многих ограничений.

Таблица 1.2.1

## Описание функций принадлежности используемых термов

Лингвистический терм	Аббревиатура	Базовая переменная	Функция принадлежности
Очень большой	ОБ	$x$	Большой $x$ * Большой $x$
Большой	Б	$x$	$1 - \exp \left[ - \left( \frac{0.5}{ 1-x } \right)^{2.5} \right]$
Выше среднего	ВС	$x$	$1 - \exp \left[ - \left( \frac{0.25}{ 0.5-x } \right)^{2.5} \right]$
Средний	С	$x$	$1 - \exp [-5 x ]$
Ниже среднего	НС	$x$	$1 - \exp \left[ - \left( \frac{0.25}{ -0.5-x } \right)^{2.5} \right]$
Маленький	М	$x$	$1 - \exp \left[ - \left( \frac{0.5}{ 1-x } \right)^{2.5} \right]$
Очень маленький	ОМ	$x$	Маленький $x$ * Маленький $x$

Таблица 1.2.2

## Алгоритмические правила относительного назначения ПР

№	Лингвистические Переменные					Назначение
	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$	$\Phi_5$	ПР
1	Б	Б	Б	ВС	Б	Б
2	Б	Б	Б	ВС	С	Б
3	Б	Б	Б	ВС	М	Б
4	ВС	М	ВС	Б	Б	Б
5	ВС	М	ВС	Б	С	Б
6	ВС	М	ВС	Б	М	Б
7	ВС	ВС	ВС	Б	Б	Б
8	ВС	ВС	ВС	С	С	ВС
9	ВС	ВС	ВС	С	М	ВС
10	С	С	С	С	Б	ВС
11	С	С	С	С	С	С
12	С	С	С	С	М	С
13	НС	НС	НС	С	Б	С
14	НС	НС	НС	С	С	С
15	НС	НС	НС	М	М	С
16	НС	М	НС	НС	Б	НС
17	НС	М	НС	С	С	НС
18	НС	М	НС	С	М	НС
19	М	НС	М	НС	Б	НС
20	М	НС	М	НС	С	НС

В ситуациях, когда ограничительные предположения требуют разумного объяснения и для прогнозирования не хватает конкретных данных, приближенное рассуждение является потенциально мощным эвристическим способом, дающим представляющую интерес альтернативу.

Использование лингвистических переменных позволяет уловить опыт и оценку руководителя, опирающегося на интуицию. Поскольку правила нечетких алгоритмов опираются на логику и здравый смысл, то руководители легко понимают подоплеку моделей. Мы предполагаем, что ясная природа данных нечетких алгоритмов увеличит шансы их эффективного применения.

#### *Принятие решений в сетевых моделях проектов с ветвлениями*

Данная глава содержит описание новой управляемой альтернативной сетевой модели (УЦАСМ), которая сформирована путем объединения двух ранее разработанных сетевых моделей:

1. Ациклической управляемой альтернативной модели (СААН) [7], содержащей два разных вида альтернативных событий. Первому соответствует неуправляемый переход к последующему развитию проекта. Второй тип альтернативных событий имеет детерминированную природу, это значит, что менеджер проекта (лицо, принимающее решение), выбирает дальнейшую альтернативу продолжения проекта, используя оптимизацию модели.

2. Циклической альтернативной сетевой модели типа УЦАСМ, включающей циклы (контур) и обладающей возможностью описания широкого спектра логических отношений [2, 5, 6, 15, 16]. УЦАСМ включает альтернативные события исключительно стохастического перехода.

УЦАСМ является конечным ориентированным циклическим графом  $G(N, A)$ , состоящим из множества  $N$  событий и дуг  $\{(i, j)\}$ ,  $i, j \in N$ , определенных матрицей смежности  $A = \{p_{ij}\}$ ,  $0 \leq p_{ij} \leq 1$ , где  $p_{ij} = 1$  соответствует детерминированной дуге  $(i, j)$ , и  $0 < p_{ij} < 1$  задает альтернативное событие  $i$ , связанное с вероятностями  $p_{ij}$ ,  $\sum_j p_{ij} = 1$  с некоторыми событиями  $j$ .

Кроме альтернативных событий стохастического перехода (обозначим их впрямь  $\bar{\alpha}$ ), присутствуют некоторые специфические события детерминированного перехода (обозначим их  $\bar{\alpha}$ ). Каждое такое событие имеет несколько дуг, выходящих из него с вероятностью 1. Реализована может быть только одна из этих дуг, ее выбор – задача менеджера проекта.

Дуги разделяются на дуги-работы и дуги-связи. Первые отражают протяженную во времени определенную деятельность, последние отражают исключительно логические отношения между действиями (работами).

УЦАСМ, представляя собой циклическую сетевую модель, включает разные типы циклов. Цикл – это последовательность дуг



$(i, i_1), (i_1, i_2), \dots, (i_{r-1}, i_r), (i_r, i)$ , из которых первая выходит из события  $i \in N$ , а последняя входит в него при  $r \geq 1$ . Цикл может быть детерминированный или стохастический. В последнем случае он обладает определенной вероятностью выхода проекта из цикла.

УЦАСМ включает в себя также сложные ограничения и логические отношения, описанные в ЦАСМ [2, 5, 6, 15].

Вследствие вышесказанного, УЦАСМ покрывает собой более широкий спектр сложных сетевых моделей, чем любая описанная выше модель.

При анализе и оптимизации УЦАСМ решаются такие проблемы, как:

- формирование полного набора непротиворечивых объединенных вариантов, которые реализуют оптимальный выбор переходов в каждом управляемом альтернативном событии;

- разработка специальной методики определения противоречий, которые вытекают из циклической структуры сетевой модели и противоречивых условиях переходов в управляемых альтернативных событиях;

- расширение класса решаемых задач, оптимизирующих целевую функцию при отсутствии противоречий.

Представленные проблемы решаются посредством итерационной процедуры обработки параметров определенных ниже объединенных вариантов и некоторых других понятий.

*Граф переходов.* При анализе модели типа СААН используется специальная сеть, которая называется граф переходов. Он определяется как  $G^*(N^*, A^*)$  и получается преобразованием начальной сети  $G(N, A)$ . Верно отношение  $N^* = n_0 \cup \langle n' \rangle \cup \bar{N} \cup \bar{\bar{N}}$ ,  $\bar{N} = \cup \bar{\alpha}$ ,  $\bar{\bar{N}} = \cup \bar{\bar{\alpha}}$ , т.е. все события графа переходов содержат исходное событие, все конечные и альтернативные события. Каждой дуге  $(i, j) \in A^*$  графа переходов соответствует определенный фрагмент  $G_{ij}$  начальной сети  $G(N, A)$ . Если разные фрагменты  $G_{ij} \subset G(N, A)$  не пересекаются, то графы  $G(N, A)$  и  $G^*(N^*, A^*)$  называются полностью разделимыми. Преобразование начальной сети к графу переходов производится в соответствии с алгоритмом, описанным в [7].

*Направление дуги.* Всем дугам  $(i, j)$ , выходящим из события  $\bar{\alpha}_i$  или  $\bar{\bar{\alpha}}_i$ , присвоим номера по часовой стрелке  $h_{ij} = 1, 2, \dots, n_i$ , где  $n_i$  – количество переходов из события  $\alpha_i$ . Направление дуги  $(i, j)$  равно порядковому номеру  $h_{ij}$ .

*Полные, частные и объединенные варианты.* Граф переходов  $G^*(N^*, A^*)$  содержит определенные дуги  $(i, j)$ , соответствующие частным вариантам, а весь путь, соединяющий начальное событие  $n_0$  с некоторым конечным событием, называется полным вариантом. Таким образом, граф переходов является совокупностью стохастических сетей с альтернативными событиями исключительно  $\bar{\alpha}$  – типа. Данные сети получают выбо-

ром разных непротиворечивых переходов в событиях  $\bar{\alpha}$  – типа, при этом исключаются остальные направления. Эти стохастические сети, являющиеся подмножеством графа переходов, называются объединенными вариантами модели *CAAN*.

Если  $\bar{N}^* = [\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2, \dots, \bar{\alpha}_m]$  – подмножество событий  $\bar{\alpha}$  – типа графа переходов  $G^*(N^*, A^*)$ , то каждый из объединенных вариантов представляет собой набор

$$V = [\bar{\alpha}_{i_1}, h_{i_1 q_1}, \dots, \bar{\alpha}_{i_r}, h_{i_r q_r}]. \quad (1.2.1)$$

*Алгоритм решения задачи оптимизации  
и ее математическая постановка*

Алгоритм решения задачи оптимизации *CAAN* включает три шага:

Шаг 1. Определить и выделить из графа переходов все объединенные варианты.

Шаг 2. Вычислить значение целевой функции и ограничений по каждому варианту.

Шаг 3. Определить оптимальный объединенный вариант и оптимальное направление до ближайшего альтернативного детерминированного события. Задача многократно решается на преобразованной сети для каждого управляемого альтернативного события типа  $\bar{\alpha}$ , в которое попадает проект при разных вариантах его реализации.

Постановка задачи: Необходимо найти объединенный вариант  $s^*$ , который оптимизирует целевую функцию

$$E[F(s^*)] = \text{Min} (\text{Max}) \sum_{s \in \nabla \subset G^*(N^*, A^*)} p_{is} F(\pi_{is}) \quad (1.2.2)$$

и удовлетворяет ограничению

$$E[H(s^*)] = \sum_{\pi_{is^*} \in \Omega_s} p_{is^*} H(\pi_{is^*}) < H. \quad (1.2.3)$$

Здесь:

$\Omega_s$  – совокупность полных вариантов, составляющих s-й объединенный вариант;

$\nabla$  – совокупность объединенных вариантов модели типа *CAAN*;

$p_{is}$  – вероятность выполнения i-го полного варианта  $\pi_{is}$  из s-го объединенного варианта;

$H(\pi_{is^*})$  – значение ограничения полного варианта  $\pi_{is^*} \in \Omega_{s^*}$ ;

$F(\pi_{is})$  – значение целевой функции при i-м полном варианте из s-го объединенного варианта;

$H$  – значение ограничения.

Если  $F$  – время, то ограничение  $H$  соответствует стоимости проекта, и наоборот. Иногда используются несколько ограничений.

### Определение объединенных вариантов

Шаг 1 заключается в последовательном использовании следующих 3-х алгоритмов [7]:

I. Формирование  $\bar{\alpha}$ -структуры графа переходов  $G^*(N^*, A^*)$ .

II. Нахождение максимальных путей в  $\bar{\alpha}$ -структуре.

III. Определение объединенных вариантов.

Результат работы каждого алгоритма служит начальной информацией для следующего.

Начальной информацией для алгоритма I являются данные о графе переходов  $G^*(N^*, A^*)$ . Эта процедура применяется только к разделимой сети.

$\bar{\alpha}$ -структура – это множество четверок  $(\alpha_i, h_{ik}, \alpha_j, p_{ijk})$ , которые удовлетворяют условиям:

- каждая четверка задает путь, соединяющий события  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$ ;
- события  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$  относятся к  $\bar{N} \cup \{n'\}$ ;
- промежуточные события между  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$  принадлежат  $\bar{N}$ ;
- $h_{ik}$  – направление дуги, выходящей из  $\alpha_i$ ;
- $p_{ijk}$  – вероятность достижения события  $\alpha_j$ , при условии выхода из  $\alpha_i$  в направлении  $h_{ik}$ .

Подробно алгоритм I, обеспечивающий построение  $\bar{\alpha}$ -структуры, описан в [7].

Для графа переходов, представленного на рис. 1.2.2,  $\bar{\alpha}$ -структура (множество четверок) выглядит следующим образом:

1,	1,	2,	1;
2,	1,	12,	0.28;
2,	1,	13,	0.42;
2,	1,	7,	0.3;
2,	2,	4,	1;
2,	3,	10,	0.4;
2,	3,	11,	0.6;
4,	1,	8,	1;
4,	2,	18,	0.3;
4,	2,	19,	0.7;
7,	1,	14,	1;
7,	2,	15,	1;
8,	1,	16,	1;
8,	2,	17,	1.

Максимальный путь в алгоритме II определяется следующим образом:

Каждая дуга  $\bar{\alpha}$ -структуры определяется тройкой  $(\alpha_i, h_{ik}, \alpha_j)$ , которые отличаются друг от друга, по меньшей мере, одним элементом.

Последовательность дуг

$$(\alpha_1, h_{1k_1}, \alpha_2), (\alpha_2, h_{2k_2}, \alpha_3), \dots, (\alpha_r, h_{rk_r}, \alpha_{r+1}), \quad (1.2.4)$$

конечные события которых, исключая последнюю, представляют собой события начала следующих, называется путем в  $\bar{\alpha}$ -структуре и имеет вид:

$$(\alpha_1, h_{1k_1}, \alpha_2, h_{2k_2}, \alpha_3, \dots, \alpha_r, h_{rk_r}, \alpha_{r+1}). \quad (1.2.5)$$

Максимальным путем в  $\bar{\alpha}$ -структуре называется путь, не являющийся частью другого пути. Каждый максимальный путь идет из исходного события  $n_0$  к определенному конечному событию в  $\{n\}$ .

*Лексикографический алгоритм отбора вариантов.* Для определения всех максимальных путей, они располагаются в лексикографическом порядке, который определяется следующим образом:

Пронумеруем все события в  $\bar{\alpha}$ -структуре числами, например,  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ . Рассмотрим различные максимальных пути:

$$X_1 = (\alpha_a, h_{ab}, \alpha_c, \dots, \alpha_e) \quad \text{и} \quad X_2 = (\alpha_m, h_{mn}, \alpha_p, \dots, \alpha_z).$$

Сравнивая попарно соответствующие элементы этих путей:  $\alpha_a$  и  $\alpha_m$ ,  $h_{ab}$  и  $h_{mn}$ ,  $\alpha_c$  и  $\alpha_p$ , и т.д., находим пару отличающихся элементов  $\alpha_f$  и  $\alpha_r$  (или  $h_{fg}$  и  $h_{rs}$ ), в то время как все другие предыдущие пары совпадают. Если  $\alpha_f < \alpha_r$  (или  $h_{fg} < h_{rs}$ ), то первый путь лексикографически предшествует второму. Таким же образом вводим лексикографический порядок на наборе всех дуг  $(\alpha_i, h_{ik}, \alpha_j)$ , которые входят в  $\bar{\alpha}$ -структуру.

Алгоритм II для определения максимальных путей описан в [10].

Для  $\bar{\alpha}$ -структуры, полученной выше для графа переходов, представленного на рис. 1.2.1, множество максимальных путей следующее:

- 1, {1}, 2, {1}, 7; {1}, 14;
- 1, {1}, 2, {1}, 7; {2}, 15;
- 1, {1}, 2, {1}, 12;
- 1, {1}, 2, {1}, 13;
- 1, {1}, 2, {2}, 4; {1}, 8; {1}, 16;
- 1, {1}, 2, {2}, 4; {1}, 8; {2}, 17;
- 1, {1}, 2, {2}, 4; {2}, 18;
- 1, {1}, 2, {2}, 4; {2}, 19;
- 1, {1}, 2, {3}, 10;
- 1, {1}, 2, {3}, 11.

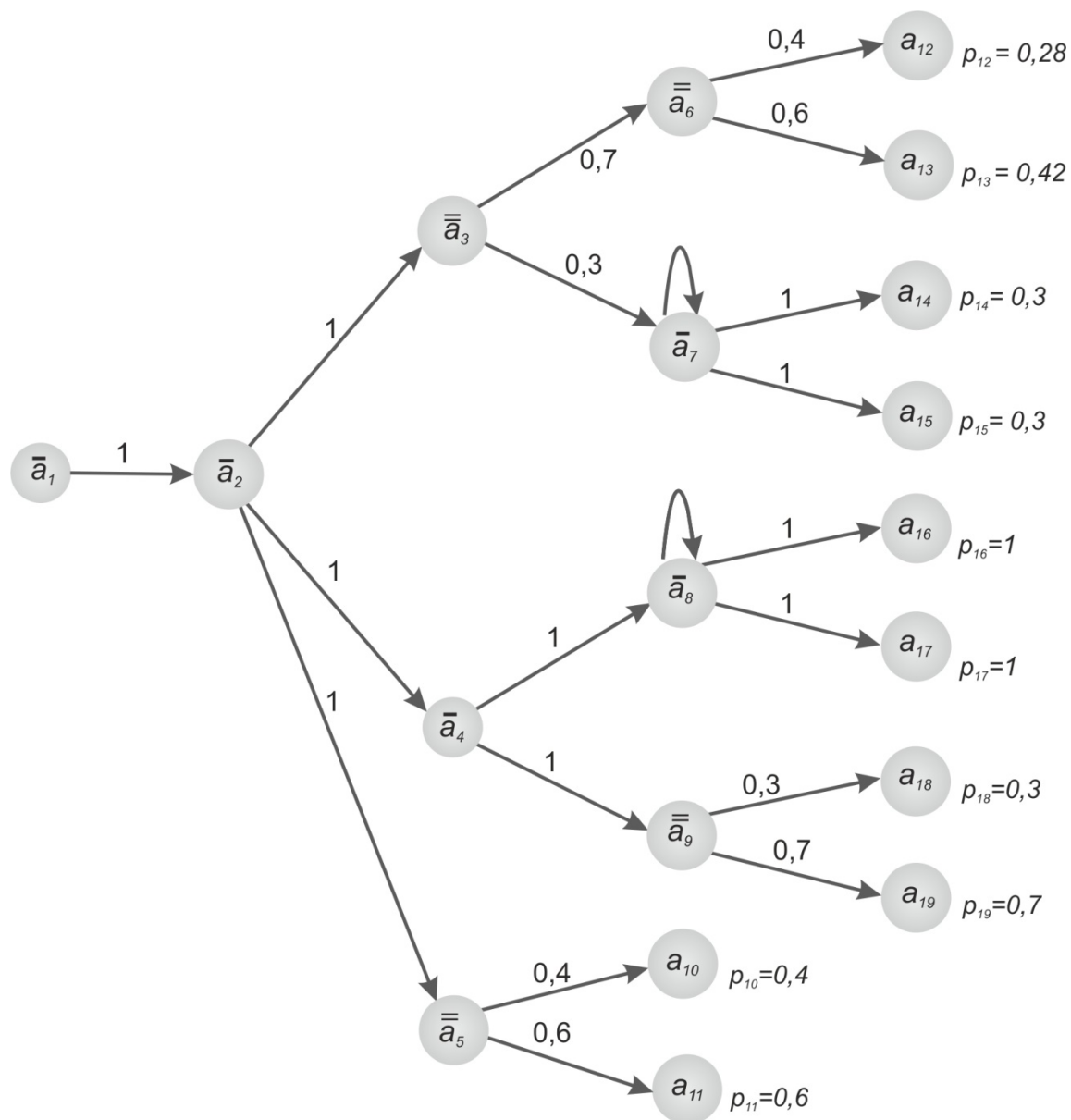


Рис. 1.2.1. Управляемая альтернативная сетевая модель проекта

Алгоритм III, определяющий объединенные варианты, включает две последовательно используемых процедуры. Процедура IIIА устраняет избыточность данных в информации, полученной при использовании алгоритма II. Процедура IIIВ определяет последовательно все объединенные варианты.

Алгоритм III использует лексикографическое упорядочение аналогично алгоритму II.

Графическое изображение шести объединенных вариантов графа переходов (рис. 1.2.1), представлено на рис. 1.2.2.

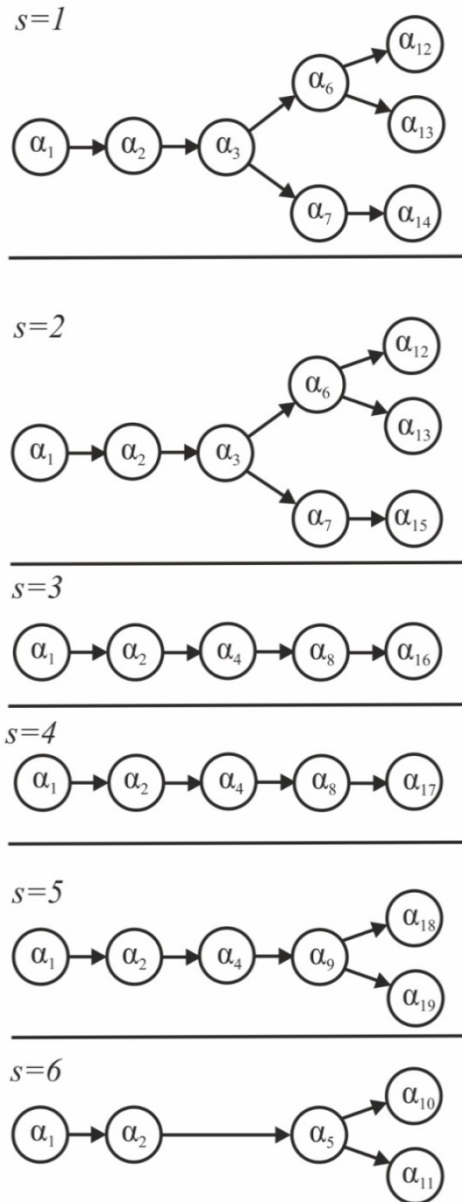


Рис. 1.2.2. Объединенные варианты проекта

*Задачи оптимизации в управляемой альтернативной циклической модели*

Для оптимизации УЦАСМ предлагается выполнить следующую итерационную процедуру, состоящую из 7 шагов:

Шаг 1. Исключение всех циклов из рассматриваемой модели УЦАСМ. Обозначим измененную ациклическую сеть УЦАСМ\*.

Шаг 2. Определение для сети УЦАСМ\* соответствующего ей графа переходов (см. [10]).

Шаг 3. Применение рассмотренных выше алгоритмов I-III для определения объединенных вариантов УЦАСМ.

Шаг 4. Преобразование каждого объединенного варианта к начальной подсети.

Шаг 5. Преобразование каждого объединенного варианта, содержащего первоначально циклы, в сетевую модель.

Рассмотрим подробно шаг 5. Пусть в событии  $i$  существует цикл  $L(i)$  ( $i$  является начальным и конечным событием для некоторого пути) со свойствами:

а) он обладает детерминированной длиной  $TЦ(i)$  и стоимостью выполнения работ  $СЦ(i)$ ,

б) он имеет вероятность  $P(i)$  выхода из цикла (или не вхождения в него),  $0 < P(i) < 1$ . Следовательно, вероятность вхождения в цикл равна  $1 - P(i)$ .

Обозначим уровень надежности  $\beta(i)$ , гарантирующий выход из цикла  $L(i)$ , при его возможном многократном выполнении.  $\beta(i)$  задаются индивидуально для разных событий в зависимости от вхождения  $i$  в критическую зону проекта [2, 6, 15] и должны быть очень близки к 1.

Для удовлетворения требованиям заданного  $\beta(i)$ , определим максимальное число последовательных «проходов» по циклу  $K_i$ . Такое значение  $K_i$  получается путем нахождения минимального  $K$ , удовлетворяющего условию

$$\sum_0^K P(i)[1-P(i)]^K \geq \beta(i). \quad (1.2.6)$$

Используя вычисленные таким образом  $K_i$  определяем средние затраты выполняемых работ цикла  $C[L(i)] \cdot \bar{K}_i$ , где  $\bar{K}_i$  – математическое ожидание случайной величины числа «проходов» в цикле, которая принимает значение от 0 до  $K_i$  с вероятностями, соответствующими членам ряда (1.2.6).

Оценки  $K_i$  получаем для всех циклов, выполняемых в проекте.

В результате выполнения шага 5 для объединенных вариантов вычисляются новые затраты и продолжительности. Для вероятностных  $L(i)$  вычисляются соответствующие параметры (например, средние значения).

Вычисленные значения  $K_i$  показывают количество «пробегов цикла», после которого проект выходит из него, возможно ухудшая целевую функцию проекта.

Шаг 6. Вводятся (при необходимости) отношения (1.2.1–1.2.2) в ССАНМ.

Шаг 7. Используя пересчитанные затраты и продолжительности времени выполнения объединенных вариантов, решаются задачи оптимизации (1.2.4–1.2.5). Выбор целевой функции для ССАНМ при этом не принципиален, обычно оптимизируются временные или стоимостные параметры проекта.

Рассмотрим числовой пример для сетевой модели, представленной на рис. 1.2.2. Модель включает три цикла  $L(5)$ ,  $L(7)$  и  $L(8)$  с параметрами:

$$CL(5) = 50; \quad P(5) = 0.6.$$

$$CL(7) = 100; P(7) = 0.8.$$

$$CL(8) = 100; P(8) = 0.7.$$

Уровень надежности для всех  $L(i)$  возьмем  $\beta_i = 0.99$ . Пусть затраты у всех работ (без циклов) имеют следующие значения:

$$C_{1,2} = 10, C_{4,8} = 11, C_{7,14} = 15,$$

$$C_{2,3} = 6, C_{4,9} = 13, C_{7,15} = 20,$$

$$C_{2,4} = 15, C_{5,10} = 12, C_{8,16} = 15,$$

$$C_{2,5} = 12, C_{5,11} = 36, C_{8,17} = 8,$$

$$C_{3,6} = 14, C_{6,12} = 10, C_{9,18} = 10,$$

$$C_{3,7} = 9, C_{6,13} = 16, C_{9,19} = 18.$$

Циклы  $L(5)$ ,  $L(8)$  и  $L(7)$  означают, что выбор дальнейшего перехода может быть осуществлен только после выхода из событий 5, 7 или 8.

Задача оптимизации сетевой модели в этом случае формулируется следующим образом: требуется выбрать объединенный вариант, минимизирующий среднюю величину стоимости реализации проекта (включающего циклы), при этом обеспечивая выбор решения для каждого достигаемого в ходе выполнения проекта детерминированного альтернативного события.

Первоначально при решении задачи все циклы исключаются, при этом используются рассмотренные выше алгоритмы получения объединенных вариантов, представленных на рис. 1.2.3. Матожидания стоимости этих объединенных вариантов вычисляются следующим образом (см. рис. 1.2.1 и 1.2.2):

$$\bar{C}(s_1) = (10+6+14+10) \times 0.18 + (10+6+14+16) \times 0.42 + (10+6+9+15) \times 0.4 = 42.52$$

$$\bar{C}(s_2) = 40 \times 0.18 + 46 \times 0.42 + 45 \times 0.4 = 44.52$$

$$\bar{C}(s_3) = 51$$

$$\bar{C}(s_4) = 44$$

$$\bar{C}(s_5) = (10+15+13+10) \times 0.4 + (10+15+13+10) \times 0.6 = 48$$

$$\bar{C}(s_6) = (10+12+12) \times 0.5 + (10+12+36) \times 0.5 = 46.$$

После определения математических ожиданий стоимости объединенных вариантов СААН-типа вставляются назад три цикла  $L(5)$ ,  $L(8)$  и  $L(7)$ , после чего получают скорректированные величины  $\bar{C}(s_1) - \bar{C}(s_6)$ , обозначенные соответственно  $\bar{C}^*(s_q)$ ,  $1 \leq q \leq 6$ .

У цикла  $L(5)$ :

$$\bar{K}_5 = 1 \cdot 0.6 \cdot 0.4 + 2 \cdot 0.4^2 \cdot 0.6 + 3 \cdot 0.4^3 \cdot 0.6 + 4 \cdot 0.4^4 \cdot 0.6 \approx 0.6,$$

т.к. соблюдается отношение

$$\sum_{q=0}^3 0.6 \cdot 0.4^q < 0.99 < \sum_{q=0}^4 0.6 \cdot 0.4^q \quad (\text{т.е. } K_5 = 4).$$



Следовательно, математическое ожидание стоимости объединенного варианта  $s_6$ , включающего цикл  $L(5)$ , увеличивается на  $0.6 \cdot 50 = 30$  и в модифицированной SSANM\* становится равным  $\bar{C}^*(s_6) = 46 + 30 = 76$ .

Для цикла  $L(7)$ :

$$\bar{K}_7 = 1 \cdot 0.8 \cdot 0.2 + 2 \cdot 0.2^2 \cdot 0.8 \approx 0.222,$$

т.к. соблюдается отношение

$$\sum_{q=0}^1 0.8 \cdot 0.2^q < 0.99 < \sum_{q=0}^2 0.8 \cdot 0.2^q \quad (\text{т.е. } K_7 = 2).$$

Следовательно, математические ожидания стоимости объединенных вариантов  $s_1$  и  $s_2$ , включающие  $L(7)$ , увеличиваются на  $0.222 \times 100 = 22.2$ , что дает новые значения стоимости

$$\bar{C}^*(s_1) = 42.52 + 22.2 = 64.72,$$

$$\bar{C}^*(s_2) = 44.52 + 22.2 = 66.72.$$

Для цикла  $L(8)$  получаем:

$$\bar{K}_8 = 1 \cdot 0.7 \cdot 0.3 + 2 \cdot 0.7 \cdot 0.3^2 + 3 \cdot 0.7 \cdot 0.3^3 \approx 0.39,$$

т.к. соблюдается отношение

$$\sum_{q=0}^2 0.7 \cdot 0.3^q < 0.99 < \sum_{q=0}^3 0.7 \cdot 0.3^q \quad (\text{т.е. } K_8 = 3).$$

Следовательно, математические ожидания стоимости объединенных вариантов  $s_3$  и  $s_4$ , включающие  $L(8)$ , увеличиваются на  $0.39 \cdot 80 = 31.2$ .

Полученные значения  $\bar{C}_3^*$  и  $\bar{C}_4^*$  поэтому следующие:

$$\bar{C}_3^* = 51 + 31.2 = 82.2,$$

$$\bar{C}_4^* = 44 + 31.2 = 75.2.$$

Объединенный вариант  $s_5$  не включает цикла, поэтому остается неизменным. Окончательные математические ожидания стоимости объединенных вариантов:

$$\bar{C}_1^* = 64.72,$$

$$\bar{C}_2^* = 66.72,$$

$$\bar{C}_3^* = 82.2,$$

$$\bar{C}_4^* = 75.2,$$

$$\bar{C}_5^* = 48,$$

$$\bar{C}_6^* = 76.$$

Таким образом, оптимальным является объединенный вариант  $s_5$  при минимальном значении стоимости. Управлять проектом необходимо следующим образом:

- при достижении события  $\bar{\alpha}_2$  далее должно выбираться направление (2, 4);
- при достижении события  $\bar{\alpha}_4$  далее необходимо выбрать направление (4, 9).

#### *Применение альтернативных стохастических моделей*

Долгосрочные, комплексные R&D проекты являются, как правило, стохастическими, так как включают случайные параметры (стоимость, продолжительность и т.д.). Кроме того, сама структура и топология в некоторых проектах (взаимосвязи работ и событий) имеют стохастическую природу. Это происходит, если имеются несколько возможных альтернативных путей достижения целей проекта.

Такие проекты часто выполняются в космической и оборонных отраслях промышленности; при строительстве уникальных объектов (морские туннели, разные системы защиты, нефтегазовые трубопроводы и т.д.); при разработке новых видов химической и фармацевтической продукции, проектов нанотехнологии и т.д.

Подобные проекты входят в состав так называемых целевых программ, определяющих тенденцию технологического развития индустриально развитых стран.

Методы сетевого моделирования в настоящее время остаются основным инструментом управления проектами. Сформированный календарный план работ позволяет менеджеру проекта и его команде планировать работы, контролировать ход их выполнения, принимать оперативные решения, прогнозировать завершение проекта. Эти методы хороши, но они решают только часть задач управления проектом. Применяемые сегодня методологии и математические модели ориентированы на одного стейкхолдера – руководителя проекта и его команду, при этом отсутствуют специализированные удобные методы и инструменты для других заинтересованных сторон.

Стандарты, ГОСТы, а также методы управления проектами со стороны различных стейкхолдеров описаны далее.

### **Глава 1.3. Стандарты управления проектами**

#### *История создания стандартов управления проектами*

Руководители проектов осуществляют управление ими в условиях быстро изменяющихся обстоятельств под влиянием разных внешних факторов, с участием многих заинтересованных сторон. Сами проекты по своей природе становятся сложнее и разнообразнее. В последнее время большее значение приобретают требования к поведенческой компетентности управляющего проектом и членов его команды.

В этой связи увеличиваются потребности в разработке адекватных поведенческих стандартов управления. Личностная позиция менеджера проекта приобретает все большую важность. Его компетентность на своем уровне в значительной степени влияет на результативность работы всей команды и успех проекта в целом. Для разработки хорошего плана проекта и достижения нужных результатов, кроме всего прочего руководитель проекта должен обладать знанием основ поведенческих наук (мотивации поведения персонала, основ теории лидерства и т.п.). И, что очень важно, руководитель проекта должен уметь эффективно ориентироваться и действовать в организационном, экономическом и социальном окружении проекта.

Разработка стандартов управления проектами осуществлялась в несколько этапов, параллельно с созданием профессиональных организаций.

В частности, создание Международных профессиональных организаций управления проектами происходило следующим образом:

– 1965 год. В Европе создана Международная Ассоциация управления проектами (с 1996 г. INTERNET, IPMA);

– 1969 год. В США открыт Институт управления проектами (PMI).

В 1970-е годы появились национальные профессиональные организации управления проектами:

– в Австралии – создание Австралийского института управления проектами (AIPM);

– в Азии – создание Японской ассоциации развития инжиниринга (ENAA).

Таким образом, в 1970-х годах сформировалось профессиональное сообщество управления проектами, объединившее специалистов разных стран в этой области.

В 1980-е годы управление проектами стало сферой профессиональной деятельности. В США публикуется первая работа коллектива института PMI – *Project Management Body of Knowledge* (свод знаний по управлению проектами), определившая место, структуру, роль методов и средств управления проектами.

В 1990-е годы были открыты новые направления приложений по управлению проектами:

1. В 1991 году в Германии выходит в свет практическое руководство по управлению проектами, подготовленное национальной Ассоциацией управления проектами Германии (GPM).

2. Повсеместно изучаются возможности использования методов и средств управления проектами для управления социально-экономическими реформами. Изучаются возможности и целесообразность использования методов управления проектами в политических, социальных, экономических разработках и крупных международных проектах.

3. 1994 год – создание и использование в управлении проектами новых технологий на базе всемирной сети Интернет.

4. Вводятся в эксплуатацию программы сертификации менеджера проекта IPMA, PMI, APM, а также международные и национальные стандарты по управлению проектами.

В 2000-е годы осуществляется развитие комплексных системных подходов к управлению проектами.

Японской Ассоциацией ENNA совместно с Форумом по управлению проектами (JPMF) проводится первый Международный Конгресс «Развитие управления проектами в Азиатско-Тихоокеанском регионе в новом веке». JPMF представляет на этом форуме Р2М «Руководство по управлению проектами и программами для инновации предприятий». В документе представлено новое видение структуры знаний по управлению проектами и обобщен богатый японский опыт. Конгресс продемонстрировал, что центр развития и применения управления проектами перемещается с Запада на Восток.

#### *Управление проектами в России*

Методы управления проектами развивались в нашей стране в русле их мирового развития с некоторым отставанием от зарубежных разработок, вызванным главным образом более низким уровнем компьютеризации и использования информационных технологий, а также масштабами практического применения теоретических разработок по управлению проектами.

В 1990 годы стало осуществляться по близким к зарубежным лекалам развитие и внедрение профессионального управления проектам.

В октябре 1990 года была создана Советская (ныне Российская) Ассоциация управления проектами СОВНЕТ.

В России стал интенсивно использоваться накопленный мировой опыт по управлению проектами. Активно исследовалась специфика использования зарубежного опыта по управлению проектами для нашей страны. Развивался также отечественный рынок программных продуктов и профессиональных услуг по управлению проектами.

В 1994–1999 гг. была разработана и активно внедрялась национальная стратегия подготовки и сертификации менеджеров проекта, соответствующая международным и национальным требованиям к компетентности и стандартам IPMA/СОВНЕТ.

В те же годы начался процесс ВУЗовской подготовки специалистов по управлению проектами, а также использования новых технологий на базе всемирной сети Интернет.

Профессиональный подход к управлению проектами все более широко распространяется в различных отраслях экономики и важнейших сферах деятельности России и других бывших республиках СССР, что было наглядно продемонстрировано на Международных симпозиумах по управлению проектами, организованных СОВНЕТ в 1991–1999 гг.

В 2000-е годы появились другие новые направления и сферы приложения управления проектами в России. В том числе управление проектами распространяется на более широкие сферы деятельности, государственное управление и др. В России появляются проектно-ориентированные организации с корпоративными стандартами, сертифицированным персоналом, проектными офисами, матричными структурами управления и т.д. В июне 2003 года в Москве проведен первый в России Всемирный Конгресс управления проектами.

В области развития методологии и фундаментальных основ управления проектами появляются системная модель и методология управления проектами, модели «третьей волны», модели проектного управления на основе сбалансированной системы показателей. При этом происходит также процесс повсеместной сертификации специалистов, создаются специализированные базы знаний в области проектного управления и т.д.

В 2009 году в России принята национальная стратегия подготовки и сертификации менеджеров проекта на базе новых версий международных и национальных требований и стандартов IPMA/СОВНЕТ.

#### *Стандарт IPMA*

Международная Ассоциация управления проектами (IPMA) оперирует тремя группами элементов компетентности при управлении проектом: техническими (20 элементов), поведенческими (15 элементов) и контекстуальными (11 элементов). При оценивании профессиональной компетентности руководителя проекта как специалиста, который планирует и контролирует проектную деятельность, контролируется знание им всех срока шести элементов. Действия руководителя проекта должны быть прозрачны, он трудится на успех всего проекта, чтобы удовлетворить требования заказчика, партнеров, поставщиков необходимых товаров и услуг и прочих заинтересованных лиц. Руководитель проекта должен уметь набирать квалифицированных специалистов и пользоваться их уважением, а также уметь мотивировать сотрудников на реализацию поставленных задач.

Стандарт является базовым документом, требования которого обязаны выполнять все Национальные ассоциации, являющиеся членами IPMA, и сертифицирующие органы, обеспечивающие последовательное и согласованное соблюдение единых стандартов при оценке кандидатов.

Учет национальных и культурных отличий обеспечивается добавлением специфических элементов компетентности в Национальных требованиях. IPMA утверждает Национальные требования (National Competence Baselines), обеспечивая их соответствие стандарту.

Международная сертификация специалистов предназначена для определения:

- соответствуют ли профессиональные знания, опыт и навыки отдельно взятого кандидата требованиям, предъявляемым в стандарте к специалисту соответствующего уровня при управлении проектами;
- соответствует ли кандидат этическим нормам и правилам Этического Кодекса управляющего проектом.

### *Стандарты PMI*

Руководства и стандарты Института управления проектами (Project Management Institute, Inc., PMI) включают в себя несколько документов.

*Руководство к Своду знаний по управлению проектами (PMBOK®)* содержит указания по управлению отдельным проектом и определяет соответствующие этому управлению концепции. Также здесь описывается жизненный цикл управления проекта, включая связанные с ним процессы, а также жизненный цикл самого проекта.

Первые два раздела PMBOK® содержат ключевые понятия в управлении проектами. Раздел 3 предоставляет обзор взаимодействий процессов в десяти областях знаний и пяти группах процессов. Разделы 4–13 содержат руководство к Своду знаний по управлению проектами.

Управление проектами завоевывает повсеместное признание в силу решающего значения для успеха проекта за счет применения соответствующих знаний, навыков, методов и инструментов. В руководстве PMBOK® выделяется часть Свода знаний по управлению проектами, которая является хорошей практикой, применимой к большинству проектов. Это не означает, что предлагаемые знания всегда одинаковым образом применяются к каждому проекту, организация может самостоятельно определять применимость тех или иных знаний к проекту.

PMBOK® предоставляет также общий словарь терминов для употребления и применения соответствующих понятий управления проектами. Словарь терминов управления проектами PMI (PMI Lexicon of Project Management Terms) могут использовать руководители проектов и разные заинтересованные стороны.

Помимо стандартов, формулирующих руководящие указания в управлении проектами, специалисты-практики используют также Кодекс профессиональной этики и поведения, разработанный Институтом управления проектами (Project Management Institute Code of Ethics and Professional Conduct). Этот Кодекс устанавливает нормы ответственности, справедливости, уважения и добропорядочности для сотрудников как внутри команды управления проектом, так и при взаимодействии с любой заинтересованной стороной проекта.

### *Российские государственные стандарты*

*ГОСТ Р 54869-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом.*

Данный стандарт устанавливает требования к управлению проектом, обеспечивающие эффективное достижение результатов проекта.

Требования стандарта относятся к управлению любыми проектами и должны применяться для всех проектов, реализуемых как юридическими, так и физическими лицами. Осуществление проектов может производиться на договорной основе или реализовываться внутри организации.

#### *Организация структура управления проектом*

Структура управления проектом в значительной степени различается в зависимости от его специфики, но в каждом проекте определяются следующие стороны:

- заказчик проекта – юридическое или физическое лицо, которое будет являться владельцем результата проекта;
- куратор проекта отвечает за обеспечение проекта всеми видами ресурсов и осуществляет финансовую, административную и прочую помощь в реализации проекта;
- руководитель проекта осуществляет управление проектом и является ответственным за его результаты;
- команда проекта – совокупность групп и организаций, отдельных лиц, объединенных во временную структуру при выполнении работ проекта.

На рис. 1.3.1 представлена схема, которая иллюстрирует основные понятия проектного управления и их взаимосвязи.

#### *Управление проектом*

Настоящим стандартом регламентируются:

1. Области управления и последовательность процессов управления проектами.
2. Процесс инициации проекта.
3. Процессы планирования проекта, включающие в себя:
4. Планирование содержания проекта.
5. Разработку расписания.
6. Планирование бюджета проекта.
7. Процесс планирования персонала проекта.
8. Процесс планирования закупок в проекте.
9. Процесс планирования реагирования на риски.
10. Процесс планирования обмена информацией в проекте.
11. Процесс планирования управления изменениями в проекте.
12. Организацию исполнения проекта.
13. Контроль исполнения проекта.
14. Организацию завершения проекта.
15. Требования к управлению документами проекта.

*ГОСТ Р 54870-2011. Проектный менеджмент. Требования к управлению портфелем проектов.* Данный стандарт устанавливает требования к управлению портфелем проектов, обеспечивающие эффективное достижение целей организации и повышение качества принимаемых решений при

планировании и контроле выполнения портфеля проектов, независимо от характеристик входящих в портфель компонентов.

*ГОСТ Р 54870-2011. Проектный менеджмент. Требования к управлению портфелем проектов.* Данный стандарт устанавливает требования к управлению портфелем проектов, обеспечивающие эффективное достижение целей организации и повышение качества принимаемых решений при планировании и контроле выполнения портфеля проектов, независимо от характеристик входящих в портфель компонентов.

Организационная структура управления портфелем проектов имеет значительные специфические отличия, но при этом обязательны следующие элементы:

- комитет управления портфелем проектов – это коллегиальный орган, служащий для принятия основных решений в управлении портфелем;
- руководитель портфеля проектов – ответственный за оперативное управление и отчитывающийся перед комитетом управления портфелем проектов;
- офис управления портфелем – структура, обеспечивающая административную поддержку руководителя портфеля и комитета управления.



Рис.1.3.1. Основные понятия проектного управления и их взаимосвязи

Рисунок 1.3.2 иллюстрирует многоуровневые понятия в управлении портфелем проектов и их взаимосвязь.

Управление портфелем проектов реализует связь между стратегическим управлением в организации и управлением проектами и программами и представляет совокупность следующих процедур:



- сбор информации об ограничениях и требованиях к портфелю проектов;
- формализация процессов управления и параметров оценки;
- идентификация компонентов портфеля;
- оценка компонентов портфеля;
- расстановка приоритетов;
- оптимизация и балансировка портфеля проектов;
- авторизация портфеля проектов;
- контроль реализации портфеля проектов;
- управление изменениями.

Данные процедуры выполняются последовательно, с некоторой циклическостью.

Кроме того, стандарт содержит требования к документации по управлению портфелем проектов.

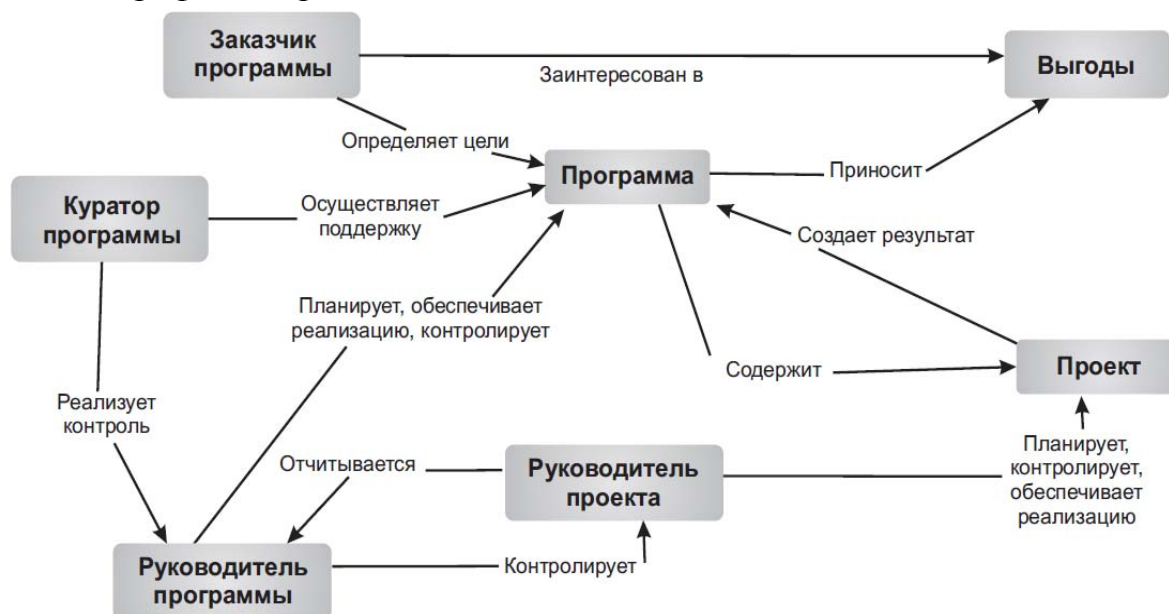


Рис. 1.3.2. Основные понятия управления программой и их взаимосвязь

### Библиографический список к части 1

1. Баркалов, С.А. Математические основы управления проектами:уч.пособие /С.А. Баркалов, В.И. Воропаев, Г.И. Секлетова и др.; под ред. В.Н. Буркова. – М.: Высшая школа, 2005. – 423 с.
2. Бурков, В.Н. Как управлять проектами / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. – М.: СИНТЕГ–ГЕО, 1997. – 188 с.
3. Воропаев, В.И. Управление проектами в современном обществе / В.И. Воропаев //«Управление проектами и программами», 2005, №1. – С. 82–95.

4. Воропаев, В.И. Обобщенные стохастические сетевые модели для управления комплексными проектами /В.И. Воропаев, Я.Д. Гельруд //Управление проектами и программами. 2008, № 1. – С. 18–27, № 2. – С. 114–125.

5. Гельруд, Я.Д. Обобщенные стохастические сетевые модели для управления комплексными проектами /Я.Д. Гельруд //Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. – 2010, № 4. – С. 36–51.

6. Гельруд, Я.Д. Управление проектами: методы, модели, системы: монография /Я.Д. Гельруд, О.В. Логиновский; под ред. д-ра техн. наук проф. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 330 с.

7. Голенко-Гинзбург, Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками / Д.И. Голенко-Гинзбург.– Воронеж: Научная книга. 2010.– 410 с.

8. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

9. Кремер, Н.Ш. Исследование операций в экономике /Н.Ш. Кремер, БА. Путко, И.М. Тришин, М.Н. Фридман; под ред. проф. Н.Ш. Кремера. – М.: ЮНИТИ, 2005. – 407 с.

10. Логиновский, О.В. Циклическая стохастическая сетевая модель как универсальное средство моделирования задач планирования и управления проектами в социальных и экономических системах / О.В.Логиновский, Я.Д. Гельруд, И.В. Емельянова.//Сб. научн. трудов Международного научно-практического семинара: Вопросы информатизации и управления органов государственной власти и местного самоуправления. – Челябинск, 2000. – 27 с.

11. Недосекин, А.О. Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций /А.О.Недосекин. – Санкт-Петербург, 2002. – 180 с.

12. Прикладные нечеткие системы /Под ред. Тэтано Т., Асаи К., Сугэно. - М: Мир, 1993. – 368 с.

13. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций / Хемди А. Таха. – пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.

14. Управление проектом. Основы проектного управления: учебник / Под ред. М.Л. Разу. – М.: КНОРУС, 2007. – 768 с.

15. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: монография/ О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков, и др.; под ред. д.т.н., проф. О.В. Логиновского, д.т.н., проф. А.А. Максимова. – М.: ИНФРА–М, 2017. – 410 с.

16. Korennaya, K.A. Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations./K.A.Korennaya, O.V Loginovsky., A.A.Maksimov, A.V. Zimin // Under editorship of D. Sc., prof. Shestakov A.L. – Kostanay : State University, Kostanay, 2014. 227 p.

17. Projectmanagement – Fachmann, GPM und RRW, Eschbom Deutschland, 1991, B.1, 2. – 1130 p.

## ЧАСТЬ 2. МЕХАНИЗМЫ УМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

### Глава 2.1. Формирование целей и задач вариантов проекта

#### *Поведение участников проекта и цель управления*

Менеджер проекта (МП) и исполнители (И) (это могут быть индивидуумы, группы и отдельные организации) способны к активному поведению, т.е. принимать решения в соответствии с собственными интересами.

В данной главе мы приведем формальные модели управления проектами, используя их теоретико-игровое описание.

В игре взаимодействие участников проекта (значения их целевых функций, функций полезности и выигрыша) зависит от собственных действий игрока (выбираемых стратегий) и от стратегий других игроков. Понимается, что игроки придерживаются гипотезы рационального поведения, что проявляется в максимизации целевых функций выигрыша выбором собственных стратегий.

При сильном различии интересов разных игроков система будет работать не лучшим образом. Для исправления такого положения дел необходимо согласовывать интересы участников. В самом простом случае, когда проект реализует менеджер проекта и один исполнитель, когда исполнитель производит два вида продукции в объемах  $x_1$  и  $x_2$ .

Доход, получаемый исполнителем, равен  $d(x_1 + x_2)$ , где  $d > 0$  – доход от единицы продукции (пусть в нашем примере  $d = 1$ ). Пусть затраты на производство выражаются  $(x_1 + x_2)^2 / 2r$ , где  $r > 0$  – некоторая константа. Квадратичная зависимость выбрана для простоты. Целевая функция исполнителя является их разностью:

$$f(x_1, x_2) = (x_1 + x_2) - (x_1 + x_2)^2 / 2r. \quad (2.1.1)$$

Пусть исполнитель стремится обеспечить значение целевой функции не меньше некоторой  $v$  ( $0 \leq v \leq 2r$ ), то есть:

$$f(x_1, x_2) \geq v. \quad (2.1.2)$$

Константа  $v$  – это полезность исполнителя, которая может быть получена в другом производстве. Кроме этого, исполнитель стремится максимизировать  $f(x_1, x_2)$  (максимум достигается при  $x_1 + x_2 = r$ ).

На рисунке 2.1.1 изображена область  $C_1B_1B_2C_2$  допустимых значений  $(x_1, x_2)$  (по условию (2.1.2)). Максимум функции  $f(x_1, x_2)$  достигается при  $x_2 = r - x_1$ . На рис.2.1.1. точки имеют координаты:

$$C_1 = B_1 = r - \sqrt{r^2 - 2rv}; \quad C_2 = B_2 = r + \sqrt{r^2 + 2rv}.$$

Пусть целевая функция МП отличается от  $f(x_1, x_2)$  в связи с заинтересованностью в другой пропорции объемов производства (отраженной коэффициентом  $a > 1$ ), при этом максимум достигается при  $(ax_1 + x_2) = R$ ,  $R > r$ :

$$\Phi(x_1, x_2) = (ax_1 + x_2) - (ax_1 + x_2)^2 / 2R. \quad (2.1.3)$$

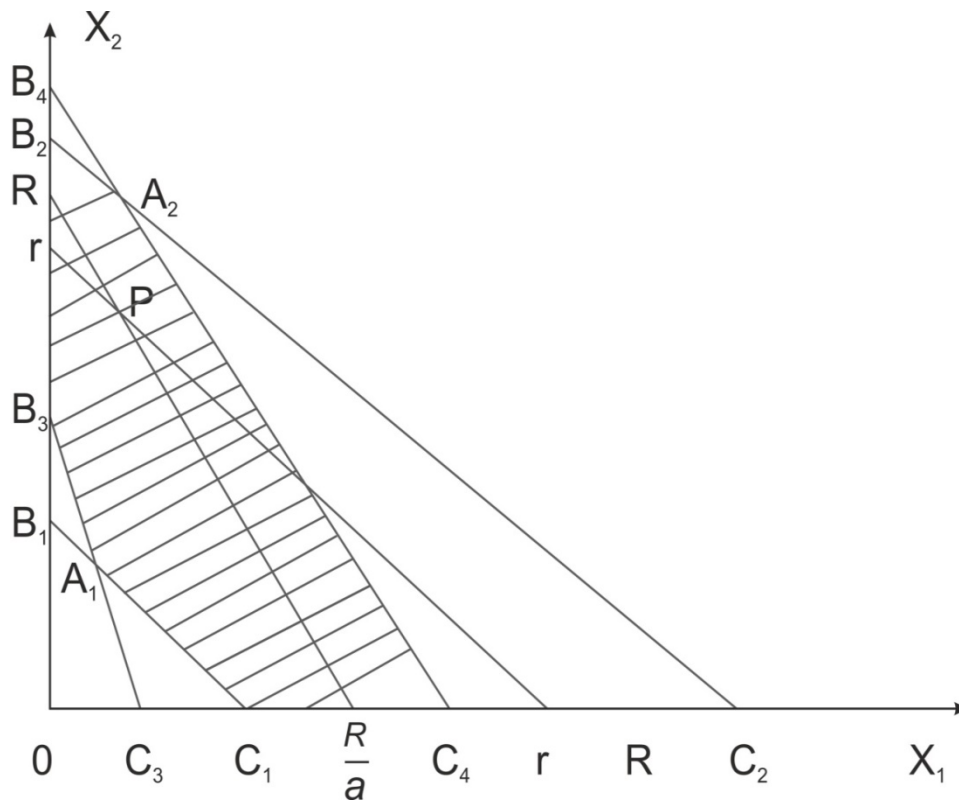


Рис. 2.1.1. Область допустимых значений

Необходимо обеспечить:

$$\Phi(x_1, x_2) \geq v \quad (2.1.4)$$

и максимизировать целевую функцию  $\Phi(x_1, x_2)$ . Область допустимых значений  $(x_1, x_2)$  (по условию (2.1.4)) представлена на рис.2.1.1. Максимум функции достигается при  $x_2 = R - ax_1$ . На рис. 2.1.1 точки имеют следующие координаты:

$$B_3 = R - \sqrt{R^2 - 2Rv};$$

$$C_3 = (R - \sqrt{R^2 - 2Rv})/a;$$

$$B_4 = R + \sqrt{R^2 - 2Rv};$$

$$C_4 = (R + \sqrt{R^2 - 2Rv})/a.$$

Область  $C_1A_1B_3B_2A_2C_4$  является областью допустимых значений. Решение  $P = (x_1, x_2)$  (идеальная цель деятельности, в ней достигаются максимумы целевых функций и МП, и исполнителя) находится внутри допустимой области, следовательно, получено полное согласование интересов МП и исполнителя.

В данном примере полное согласование было получено без управления со стороны менеджера проекта. Ситуации, в которых идеальная точка не принадлежит допустимой области и необходимо вводить управление, будут рассмотрены в главе 2.2.

Некоторые рекомендации по выбору управления для максимального согласования интересов будут рассмотрены в главе 2.3.

### *Механизм функционирования организационных систем*

Это набор правил, процедур, законов, инструкций взаимодействия элементов системы, определяющийся заданием: целевых функций отдельных элементов системы; процедур принятия решений; порядка, регламентирующего функционирование организационной системы; информированности элементов системы на момент выбора ими своей стратегии.

Управляющий орган МП заинтересован в максимизации эффективности функционирования.

При заданных «правилах игры» МП может изменять целевые функции отдельных элементов системы и правила принятия решений.

В общем случае МП может устанавливать порядок функционирования, изменять информированность исполнителей, формировать состав и структуру связей системы.

Рассмотрим пример, описывающий механизм функционирования организационной системы. Система включает управляющий орган МП и два производственных элемента  $I_1$  и  $I_2$ , соединенные в технологическую цепочку, где продукция первого исполнителя используется вторым исполнителем при производстве конечного продукта.

Пусть выход продукции первого исполнителя зависит от количества сырья  $R$  и затрат  $l_1 \geq 0$  по формуле:

$$y_1 = 2R \sqrt{l_1}. \quad (2.1.5)$$

Выход первого исполнителя является сырьем для второго исполнителя, который производит  $y_2$  единиц продукта при затратах  $l_2 \geq 0$ :

$$y_2 = 2y_1 \sqrt{l_2}. \quad (2.1.6)$$

За единицу конечного продукта исполнители получают зарплату  $s_1(y_2)$  и  $s_2(y_2)$ , которая устанавливается МП,  $s_1(y_2) + s_2(y_2) \leq C$ , и несут затраты:

$$C_1(l_1) = \frac{\alpha_1 l_1^2}{2} \quad (2.1.7)$$

и

$$C_2(l_2) = \frac{\alpha_2 l_2^2}{2}. \quad (2.1.8)$$

В результате МП получает доход  $\lambda y_2$ , где  $\lambda$  – цена конечного продукта. Элементы системы имеют целевые функции:

$$\text{МП: } \lambda y_2 - s_1(y_2) - s_2(y_2), \quad (2.1.9)$$

$$I_1: s_1(y_2) - C_1(l_1), \quad (2.1.10)$$

$$I_2: s_2(y_2) - C_2(l_2). \quad (2.1.11)$$

Итак, рассматриваемый пример имеет структуру, приведенную на рис. 2.1.2.

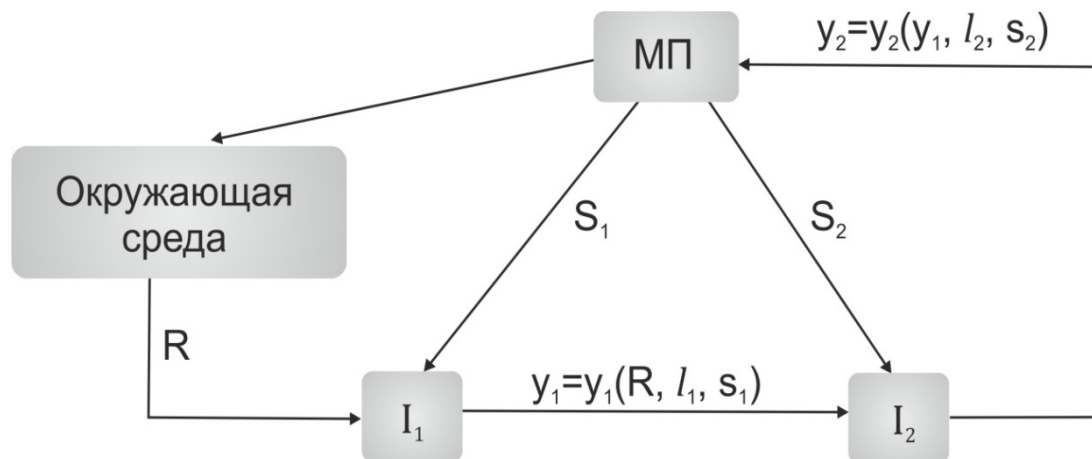


Рис 2.1.2. Механизм функционирования организационной системы

Стратегией элементов системы является выбор таких  $s_1(\bullet)$ ,  $s_2(\bullet)$  для МП,  $l_1$  для  $I_1$ ,  $l_2$  для  $I_2$ , которые максимизируют целевые функции (2.1.9)–(2.1.11). Соотношения (2.1.5)–(2.1.8), ограничения  $s_1 + s_2 \leq C$ ,  $l_1 \geq 0$ ,  $l_2 \geq 0$ , определяют множества допустимых значений переменных  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ .

Порядок функционирования системы следующий:

- МП задает исполнителям зависимости зарплаты исполнителей от количества произведенного продукта  $s_1(\bullet)$  и  $s_2(\bullet)$ ;
- первый исполнитель выбирает  $l_1$  – количество часов работы;
- второй исполнитель определяет  $l_2$  – количество часов работы;
- МП продает  $y_2$  конечного продукта, получая доход и выплачивая зарплату исполнителям.

Информированность элементов:

а) зависимости (2.1.5)–(2.1.11), МП и всем исполнителям известны все ограничения и выбираемые стратегии;

б) 1-й исполнитель при выборе  $l_1$  помимо всех ограничений знает выбранное МП  $s_1(\bullet)$ , и величину  $R$ ;

в) 2-й исполнитель при выборе  $l_2$  помимо всех ограничений знает  $s_2(\bullet)$  и  $y_1$ .

Механизм управления заключается в выборе зависимостей  $s_1(l_1)$  и  $s_2(l_2)$ . МП с одной стороны, стремится максимизировать доход (2.1.9), а с другой стороны, побуждает исполнителей выбрать действия, чтобы не разориться (условие  $s_1 + s_2 \leq C$  не гарантирует в общем случае неотрицательности (2.1.9)). Какую зависимость зарплаты от количества отработанных часов необходимо выбрать МП? Ниже будет дан ответ на этот вопрос по рассматриваемому примеру.

#### *Механизмы комплексного оценивания*

Реализация большого проекта, имеющего сложную иерархическую структуру, зависит от слаженной деятельности всех участников. Важней-

шая задача, решаемая руководством проекта, – распределение материальных и финансовых ресурсов между всеми участниками проекта, обеспечивающее успешную его реализацию. Какие критерии определяют успешную реализацию проекта?

Реализуя проект в целом, как правило, решается ряд задач разных уровней его иерархической структуры. Детализируя последовательно структуру проекта, получаем дерево задач, называемое деревом целей. Корнем его является агрегированный показатель уровня реализации проекта, промежуточными вершинами – показатели деятельности исполнителей.

Рассмотрим последовательную детализацию элементарного качественного примера, который в ходе изложения позволит проиллюстрировать предлагаемую модель. Суть проекта – социально-экономическое развитие региона.

Комплексным показателем выберем критерий  $Q$  (уровень социально-экономического развития), который определяют критерий  $Q_3$  (уровень социального развития) и критерий  $Q_4$  (уровень экономического развития). Пусть последний критерий определяется с помощью критерия  $Q_1$  (уровень жизни) и критерия  $Q_2$  (экологическая ситуация).

Таким образом, проект представляется в виде дерева целей, достижения которых оцениваются в дискретной шкале.

Определение оценки на каждом уровне производится по правилам агрегирования из оценок более низких уровней. В качестве правил агрегирования будем использовать логические матрицы свертки.

Для каждого критерия введем дискретную шкалу от 1 до 4 (плохо, удовлетворительно, хорошо и отлично). Для определения процедуры агрегирования оценок по критерию  $Q$ , который зависит от оценок по  $Q_3$  и  $Q_4$ , определим матрицу  $A = \|a_{i,j}\|$ , в которой  $a_{i,j}$  – оценки по критерию  $Q$  при оценке  $i$  по  $Q_3$  и  $j$  по  $Q_4$ .

Аналогично введем матрицу свертки критерия  $Q_4$ , который зависит от  $Q_1$  и  $Q_2$ . Для рассматриваемого примера матрицы свертки приведены на рисунке 2.1.3. Например, при оценке «3» по критерию  $Q_1$  и оценке «2» по критерию  $Q_2$  получаем агрегированную оценку «2» по критерию  $Q_4$ .

Если по критерию  $Q_3$  достигнута оценка «4», то итоговая оценка по критерию  $Q$  будет «3».

Структура дерева целей, шкала оценок и матрицы свертки с учетом приоритетов выбираются либо формируются лицами, принимающими решения (МП), либо коллективом экспертов.

Формирование матриц агрегирования должно следовать правилу монотонности – результирующая оценка, которая получается при увеличении хотя бы одной исходной агрегируемой оценки, не должна быть меньше первоначальной.



Рис. 2.1.3 Матрица свертки

## Глава 2.2. Выбор варианта проекта

### *Задачи управления проектами и согласование интересов исполнителей*

Ранее отмечалось, что эффективное выполнение проекта требует согласования интересов всех его участников. Однако идеальная точка, где достигается максимум целевых функций участников проекта, не всегда принадлежит допустимой области. Продолжим детализацию примера, описанного ранее.

На рисунке 2.2.1 приведена допустимая область  $C_1A_1B_3B_2A_2C_4$ , которая была получена с учетом ограничений на параметры менеджера проекта и исполнителей.

Введем дополнительное ограничение на суммарную стоимость производства продукции:

$$c_1x_1 + c_2x_2 < c, \quad (2.2.1)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – стоимости производства единиц продукции первого и второго типа соответственно.

Общие средства равны  $c$ .

Предположим также, что существует ограничение на срок производства продукции  $T$ . При этом на выпуск единицы первой продукции требуется  $T_1$  времени, а на выпуск единицы второй продукции требуется  $T_2$  времени. Если оба типа продукции можно производить параллельно, то общее время определяется  $\max\{T_1x_1; T_2x_2\}$ . Получаем условие:

$$\max\{T_1x_1; T_2x_2\} \leq T. \quad (2.2.2)$$



На рис. 2.2.1 представлена допустимая область с учетом ограничений (2.2.1) и (2.2.2). Координаты точек на рисунке 2.2.1 равны:  $B_5 = c/c_2$ ;  $C_5 = c/c_1$ ;  $B_6 = T/T_2$ ;  $C_6 = T/T_1$ .

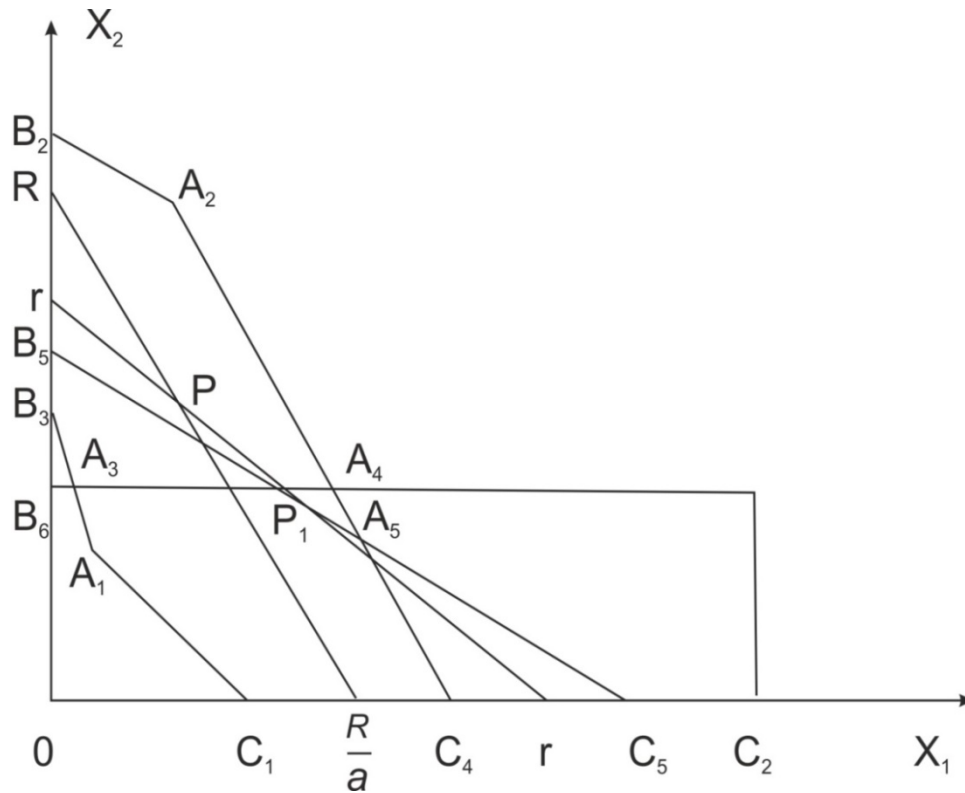


Рис. 2.2.1. Допустимая область  $C_1A_1A_3A_4A_5C_4$

Теперь идеальная точка  $P$  не принадлежит допустимой области  $C_1A_1A_3A_4A_5C_4$ . Исполнитель, максимизируя свою целевую функцию, выбирает допустимые объемы производства, лежащие на прямой  $(r; 0) - (0; r)$ . На этой прямой его целевая функция имеет постоянное значение, поэтому примем, что он выберет наиболее выгодные для МП объемы производства (точку  $P_1$ , не лежащую на прямой  $(R/a; 0) - (0; R)$  и не оптимальную для МП).

Таким образом, при введении дополнительных ограничений полное согласование интересов может не быть достигнуто. Для большего согласования интересов исполнителей со своими интересами МП необходимо вводить управление.

Как это делать в некоторых случаях, используя модели стимулирования, рассматривается далее.

#### *Синтез оптимальных механизмов управления*

Выбор механизма управления зависит от задания «правил игры» – ограничений на параметры модели, последовательности принятия решений и информированности элементов системы, которые определяют область до-

пустимых возможных механизмов. Для двух произвольных допустимых механизмов введем правило выбора. Для МП тот механизм «лучше», который имеет большую эффективность. Эффективностью механизма считается степень достижения целей МП при функционировании этого механизма. В каждом конкретном случае формализация понятия «цели» и «степени ее достижения» является сложной задачей, решаемой МП с привлечением экспертов.

Оптимальным механизмом управления является механизм с максимальной эффективностью из всех допустимых механизмов.

Введем еще некоторые характеристики механизма управления. Если действия (состояния), выбираемые исполнителями, совпадают с желательными действиями для МП, то такой механизм называется согласованным. При возможности обмена информацией в процессе функционирования системы и сообщении при этом достоверной информации (не искажающей данные, не манипулирующей ими), механизм называется неманипулируемым. Механизм, который одновременно является согласованным и неманипулируемым, называется правильным [4]. К сожалению, сочетание оптимальности и правильности крайне редко встречается на практике (некоторые примеры будут рассмотрены в данной главе, более подробную информацию см. в [5]).

Целевая функция менеджера проекта, выражающая интересы системы, имеет вид:

$$F = 4\lambda R\sqrt{l_1 l_2} - s_1(l_1) - s_2(l_2). \quad (2.2.3)$$

Целевые функции исполнителей:

$$F_1 = s_1(y_2) - \frac{\alpha_1 l_1^2}{2}, \quad (2.2.4)$$

$$F_2 = s_2(y_2) - \frac{\alpha_2 l_2^2}{2}, \quad (2.2.5)$$

Предположим, что функции поощрения, которые менеджер проекта может использовать, имеют линейный вид:

$$s_1(y_2) = b_1 y_2, \quad b_1 > 0, \quad (2.2.6)$$

$$s_2(y_2) = b_2 y_2, \quad b_2 > 0. \quad (2.2.7)$$

Задача нахождения оптимального механизма управления тогда заключается в выборе МП таких значений  $\{b_1, b_2\}$ , что  $(b_1 + b_2)y_2^* \leq C$ ,  $b_1 > 0$ ,  $b_2 > 0$ , ( $y_2^*$  – объем производства конечного продукта), при которых выражение (2.2.3) принимает максимальное значение. Получилась классическая задача стимулирования (задачи стимулирования исполнителей подробно рассматриваются в главе 2.4).

Математическая постановка задачи нахождения оптимального механизма управления представляется в виде:

$$4\lambda R\sqrt{l_1^*l_2^*} - 4b_1R\sqrt{l_1^*l_2^*} - 4b_2R\sqrt{l_1^*l_2^*} \rightarrow \max_{b_1, b_2}, \quad (2.2.8)$$

$$4R\beta b_1\sqrt{l_1^*l_2^*} - \frac{\alpha_1 l_1^{*2}}{2} \geq 4b_1R\sqrt{l_1^*l_2^*} - \frac{\alpha_1 l_1^{*2}}{2} \quad \forall l_1 \geq 0, \quad (2.2.9)$$

$$4Rb_2\sqrt{l_1^*l_2^*} - \frac{\alpha_2 l_2^{*2}}{2} \geq 4b_2R\sqrt{l_1^*l_2^*} - \frac{\alpha_2 l_2^{*2}}{2} \quad \forall l_2 \geq 0, \quad (2.2.10)$$

$$l_1, l_2 \geq 0; b_1, b_2 > 0; (b_1 + b_2)4R\sqrt{l_1^*l_2^*} \leq C. \quad (2.2.11)$$

Функции исполнителей  $F_1$  и  $F_2$  строго вогнуты по их собственным действиям ( $l_1$  и  $l_2$  соответственно). Таким образом, для любых  $\{b_1, b_2\}$  существует единственная точка равновесия, определяемая (2.2.9)–(2.2.10). Получаем:

$$l_1^* = 2R \left[ \frac{b_1^3 b_2}{\alpha_1^3 \alpha_2} \right]^{1/4}, \quad l_2^* = 2R \left[ \frac{b_1 b_2^3}{\alpha_1 \alpha_2^3} \right]^{1/4}. \quad (2.2.12)$$

Подставляя (2.2.12) в (2.2.8) с учетом (2.2.11), получаем:

$$b_1^* = b_2^* = \frac{1}{4R} [\alpha_1 \alpha_2 C^2]^{1/4}. \quad (2.2.13)$$

Следовательно, (2.2.13) является оптимальным решением задачи нахождения механизма управления.

Анализ решения (2.2.12)–(2.2.13) показывает, что рост фонда заработной платы  $C$  напрямую связан с ростом выплат исполнителям и ростом количества часов, которое исполнители должны отработать. С ростом коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  растут также затраты на стимулирование, при этом количество часов, которое исполнители должны отработать, уменьшается.

К сожалению, не всегда удается аналитически решить задачу нахождения оптимального механизма управления. Иногда приходится привлекать более мощные вычислительные средства и методы.

#### *Выбор оптимальных вариантов проекта с использованием комплексного оценивания*

Каждый конкретный исполнитель имеет свои показатели качества, сроков, затрат, риска, которые взаимосвязаны и взаимозависимы. При определении этих зависимостей решается ряд оптимизационных задач стимулирования: как распределить ограниченный фонд финансирования, чтобы стимулировать исполнителя к достижению требуемого или максимально возможного уровня оценки.

#### *Анализ качества*

Анализируя дерево целей и используя логические матрицы для каждой возможной итоговой оценки, определяем соответствующие им оценки для элементов-исполнителей, спускаясь сверху вниз по дереву целей. Для нашего примера соответствующее дерево оценок при значении  $Q = 4$  представлено на рис. 2.2.2. Сама же оценка  $Q = 4$  является комбинацией оценок по критериям ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ): (4;4;4); (3;4;4); (4;1;4); (4;2;4); (4;3;4); (3; 3;4); (2;3;4); (2;4;4). Подобные деревья строим и для других оценок.

Комбинации оценок нижнего уровня, которые приводят к достижению необходимой итоговой комплексной оценки, являются вариантами развития проекта.

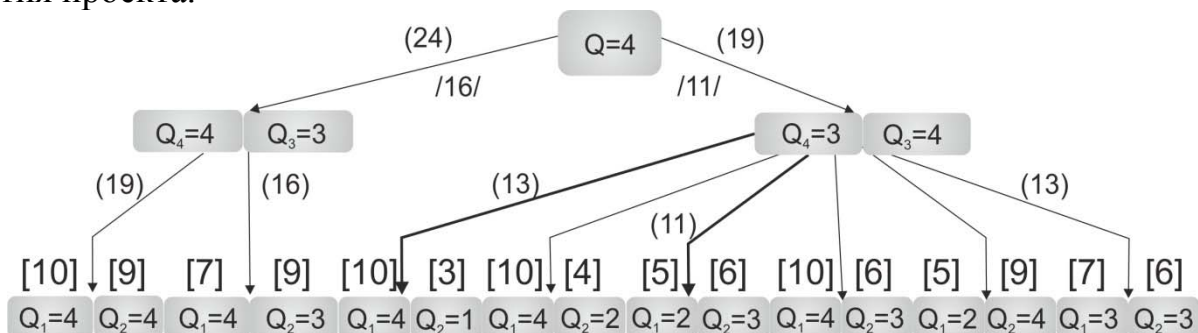


Рис. 2.2.2. Дерево оценок при значении  $Q = 4$

### Анализ затрат

Процесс агрегирования затрат предполагает заданными затраты исполнителей на достижение фиксированной оценки. Начиная с уровня элементов-исполнителей, процедура движется вверх, определяя варианты минимальной стоимости. При этом суммируются затраты элементов нижнего уровня для получения каждой агрегированной оценки. При наличии в точке ветвления нескольких вариантов выбирается вариант, дающий минимальные затраты. Результирующий вариант определяется методом сверху вниз.

В рассматриваемом примере на рис. 2.2.2. значения затрат для показателей нижнего уровня приведены в квадратных скобках. В круглых скобках приведены суммарные затраты некоторых вариантов.

Так, для достижения  $Q_4 = 4$  имеется два варианта –  $(Q_1 = 4, Q_2 = 4)$  с затратами (19) и  $(Q_1 = 4, Q_2 = 3)$  с затратами (16). Выбираем более дешевый вариант с затратами (16). Для  $Q_4 = 3$  наиболее дешевый вариант  $(Q_1 = 2, Q_2 = 3)$  с общими затратами (11). Получаем вариант  $(Q_1 = 2, Q_2 = 3, Q_3 = 4)$  с наименьшими затратами по достижению  $Q = 4$ .

### Анализ риска

Рассмотрим теперь понятие риска. Пусть заданы вероятности реализации для каждой оценки каждого критерия нижнего уровня, образующие полную систему событий. Процедура определения вероятностей реализации для агрегированных оценок заключается в следующем. При условии независимости результатов деятельности элементов-исполнителей, а также агрегируемых оценок, вероятность каждой агрегированной оценки будет равна сумме произведений вероятностей оценок нижнего уровня, которые формируют это значение агрегированной оценки.

Пусть в рассматриваемом примере для некоторой системы стимулирования по критерию  $Q_1$  (уровень жизни) и критерию  $Q_2$  (экологическая ситуация) вероятности оценок 1, 2, 3, 4 равны  $p_1 = 1/6$ ;  $p_2 = 1/3$ ;  $p_3 = 1/3$ ;

$p_4 = 1/6$  и  $q_1 = 1/8$   $q_2 = 1/2$ ;  $q_3 = 1/4$ ;  $q_4 = 1/8$  соответственно, а вероятность достижения  $Q_3 = 4$  равна  $1/24$ . Тогда вероятность  $Q = 4$  по критерию «уровень социально-экономического развития»  $r_4 = 1/8 \cdot 1/6 + 1/24 = 1/16$ . Аналогично  $r_3 = 7/16$ ,  $r_2 = 7/16$ ,  $r_1 = 1/16$ .

Двигаясь по дереву целей от вероятностей оценок снизу вверх, получаем вероятности для оценок итогового критерия.

Разберем теперь понятие риска для проекта в целом. Пусть мы имеем цель – обеспечить комплексную оценку не меньше заданного критического значения. Тогда риском будем считать сумму вероятностей комплексных оценок, которые меньше критической. В сложных социально-экономических системах однозначно установить допустимые значения параметров достаточно сложно. Они определяются либо экспертами, либо ЛПР (лицо, принимающее решения). В рассматриваемом примере при критическом значении  $Q = 3$  нормальное функционирование системы будет обеспечено недостижением, как минимум, величин  $Q_3 = 3$ ,  $Q_4 = 3$ , область значений  $Q_3 = 3$ ,  $Q_4 = 2$  или  $Q_3 = 2$ ,  $Q_4 = 4$  и т.д.

#### *Анализ сроков выполнения*

Каждый конкретный вариант (набор оценок по критериям исполнителей) имеет заданные времена их достижения. Допустимая последовательность выполнения операций (работ) и, соответственно, общее время реализации некоторого варианта проекта определяются технологическими и другими ограничениями. Выбор оптимальной последовательности производства работ, учитывающей все ограничения, является задачей сетевого планирования и рассматривалась нами в части 1. Пусть нам известно решение этой задачи, в каждом варианте проекта определено минимальное время его выполнения.

Пусть нам известны сроки достижения оценок по всем критериям  $Q_1$ ,  $Q_2$ , и  $Q_3$ . Для рассмотренного выше варианта минимальной стоимости при анализе затрат ( $Q_1 = 2$ ,  $Q_2 = 3$ ,  $Q_3 = 4$ ), соответствующие времена пусть будут равны  $t_1 = 4$ ,  $t_2 = 2$  и  $t_3 = 5$  у.е. При одновременном начале работ и параллельном их выполнении время реализации этого варианта равно максимуму времени достижения требуемых оценок,  $T = \max \{4, 2, 5\} = 5$ . Если же задана другая последовательность выполнения работ, например, сначала достигается значение  $Q_4 = 3$ , а потом  $Q_3 = 4$ , то общее время выполнения проекта равно сумме сроков реализации этих оценок:  $T = t_3 + t_4 = 5 + \max \{4, 2\} = 9$ .

#### *Постановка задачи стимулирования*

Теперь, зная методы построения системы комплексного оценивания, дерева оценок, определения затрат варианта, его риска и сроков выполнения, свяжем между собой эти параметры, установим вид их взаимозависимости для возможности выбора наилучшего варианта. В этой главе опишем кратко задачу стимулирования исполнителей, более подробно она будет изложена в 2.6.

Интересы каждого исполнителя выражает целевая функция. В соответствии с гипотезой рационального поведения он выбирает действие, максимизирующее значение целевой функции исполнителя.

Она связана с системой стимулирования, под которой будем понимать зависимость результатов деятельности исполнителя от величины выплат, которые он получает от руководства проекта. Таким образом, руководство проекта получает возможность управления выбираемыми действиями и, соответственно, вероятностями оценок, риском и сроками выполнения.

Решая задачу стимулирования, мы определяем вид взаимозависимости оценок затрат, качества, риска и сроков.

#### *Определение оптимального варианта*

Варианты оцениваются по нескольким критериям, возникает многокритериальная оптимизационная задача.

Допустимым вариантом будем считать вариант, удовлетворяющий всем априорным требованиям по срокам его выполнения, затратам, риску и взаимосвязям показателей исполнителей. Ниже опишем алгоритм нахождения допустимого варианта.

1. Решаем задачу стимулирования для определения объема минимального финансирования, необходимого при выборе действия для получения значений оценок качества каждого исполнителя. Вычисляем риск и срок выполнения.

2. При ограниченном фонде финансирования конкретного исполнителя из полученных комбинаций оставляем те, которые удовлетворяют требованиям.

3. Для каждой оставленной комбинации финансирования находим значения общих затрат, комплексную оценку, риск и срок выполнения для проекта.

В результате получаем набор допустимых вариантов.

При выборе оптимального варианта вводится критерий сравнения всех допустимых вариантов. Выбирается вариант с минимальными затратами и риском, не превосходящим заданного значения, или вариант с минимальным сроком выполнения и затратами, не больше заданного значения и т.д.

Введем понятие *напряженного варианта*, по аналогии с оптимальным планом по Парето [6]. Напряженным назовем вариант, при котором недостижение оценки по одному из направлений приводит к недостижению заданной величины комплексной оценки. На рисунке 2.2.2 у оценки  $Q = 4$  напряженным будет являться вариант  $Q_3 = 4, Q_4 = 3$ . Для оценки  $Q_4 = 3$  напряженными будут являться варианты  $(Q_1 = 4; Q_2 = 1)$  и  $(Q_1 = 2; Q_2 = 3)$ . Напряженные варианты выделены на рисунке 2.2.2 жирными дугами.

Введение напряженных вариантов позволяет резко ограничить число возможных комбинаций (в рассматриваемом примере необходимо анализировать 2 варианта, а не 8). Кроме того, использование напряженных вариантов позволяет исключить в системе «избыточность», заключающуюся

в том, что при отказе одного из исполнителей происходит срыв всего проекта, из чего следует, что напряженные варианты есть варианты минимальной стоимости. Еще одним достоинством напряженного варианта является простота определения риска соответствующей комплексной оценки – для этого вычисляется произведение рисков всех исполнителей.

Напряженные варианты особенно удобно использовать при минимизации объема финансирования, необходимого для получения заданного значения комплексной оценки. В «анализе затрат» описан простой алгоритм получения варианта минимальной стоимости. Если полученный вариант имеет допустимое значение величины риска, то получаем решение задачи.

### **Глава 2.3. Формирование состава исполнителей**

Правильно сформулированные цели, корректно поставленные задачи, выбор соответствующих методов и механизмов управления могут оказаться напрасными, если не решить важнейшую задачу, стоящую перед МП – сформировать квалифицированную команду, с которой он будет работать.

Ниже описаны некоторые возможные подходы.

Исходные данные для задачи формирования команды исполнителей:

- 1) требования к проекту и результатам его реализации (объем и качество работ, необходимые ресурсы, сроки выполнения работ, этапов, всего проекта, риск и т.п.);
- 2) множество потенциальных исполнителей, характеризующихся своими возможностями по затратам, срокам и качеству выполнения соответствующих работ;
- 3) порядок взаимодействия исполнителей, учитывающий их совместимость, последовательность работ, технологии и т.д.

Алгоритм решения задачи в общем случае заключается в выделении допустимых комбинаций претендентов (удовлетворяющих требованиям к проекту), а затем в выборе «наилучшей» комбинации. При этом возникают три трудности. Первая связана со сложностью формализации требований к проекту, возможностей претендентов, порядка их взаимодействия и т.п. Вторая трудность в определении «наилучшей» комбинации. И, наконец, третья заключается в вычислительной сложности задачи, для которой построена адекватная формальная модель, выбраны критерии оптимальности, поэтому, как правило, приходится разрабатывать специальные методы решения.

Ниже рассмотрим некоторые механизмы организации команды исполнителей, следующие описанному выше алгоритму, а также рассмотрим ряд частных случаев.

### Конкурсы исполнителей

Конкурсы исполнителей могут иметь различные организационные модели. Рассмотрим сначала простую ситуацию, когда конкурс (тендер) объявляется на выполнение проекта в целом.

Все претенденты подают заявки на участие в конкурсе, где каждый указывает свои характеристики, например, ожидаемый эффект  $l_i$  в случае реализации им проекта, и необходимую величину средств  $s_i$ . Конкурсная комиссия определяет оценку эффекта  $l_i$ , учитывая репутацию претендента, его квалификацию, опыт реализации подобных проектов и т.п., и на основе этих данных определяет победителя конкурса.

В простейшем случае эффективность определяется по формуле  $\varepsilon_i = l_i/s_i$  и побеждает претендент с максимальной величиной эффективности. При таком способе победить может претендент, выполняющий проект «дешево, но плохо». Иногда в условия конкурса вводят ограничение  $l_i \geq l_{\text{зад}}$ , а победитель определяется по величине  $s_i$ . Или наоборот, вводятся ограничения на необходимые средства  $s_i \leq s_{\text{необ}}$ , а победитель определяется по величине эффекта  $l_i$ .

Для выбора по конкурсу исполнителя определим критерий эффективности. Он должен зависеть и от ожидаемого эффекта от работы претендента, и от суммы, которую он требует за свою работу. Пусть эффективность претендентов оценивается по разности  $l_i - \lambda s_i$ , где коэффициент  $\lambda$  соотносит эффект и затраты. Пусть  $c_i$  – минимальный уровень затрат по проекту, при котором  $i$ -му претенденту еще имеет смысл принимать участие в конкурсе. Пусть претенденты пронумерованы по убыванию величин  $\varepsilon_i = l_i - \lambda c_i$ , ( $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \dots \geq \varepsilon_n$ ). Таким образом, первый претендент победит в конкурсе, если он сообщит величину необходимых средств, равную  $c_1$ . Рассмотрим некоторые процедуры определения победителей и оценим их эффективность.

Пример 1. Предположим, что победитель определяется по величине  $\varepsilon_i$  (прямой конкурс). Тогда победит претендент с меньшим номером, который в процессе торгов сообщит заявку  $s_i$ , удовлетворяющую условию  $\varepsilon_1 = l_1 - \lambda s_1 = l_2 - \lambda c_2 = \varepsilon_2$  или  $s_1^* = c_2 + \frac{1}{\lambda}(l_1 - l_2) \geq c_1$ .

Отношение  $k = \frac{l_1 - \lambda s_1^*}{l_1 - \lambda c_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$  характеризует эффективность конкурса (потери организатора) за счет того, что победитель завысил величину требуемых средств.

Так, если  $l_1 = 20$ ,  $c_1 = 5$ ,  $\lambda = 1$ ,  $l_2 = 30$ ,  $c_2 = 25$ , то получаем  $s_1^* = 25 - 10 = 15$ , а эффективность конкурса  $k = (20 - 15)/(20 - 5) = 1/3$ , что составляет всего  $\frac{1}{3}$  от возможной эффективности.

Пример 2. Пусть конкурс проводится в два этапа (двухэтапный конкурс). На первом этапе группа победителей отбирается по критерию  $(l_i - \lambda_1 s_i)$ , второй этап заключается в выборе победителя из этой группы, ис-



пользуя основной критерий  $\Xi_i = l_i - \lambda s_i$ . Идея двухэтапного конкурса заключается в подборе такого значения  $l_1$ , чтобы первый претендент стал победителем, и нашелся бы еще один  $i$ -й претендент «равный» первому, также ставший победителем, то есть  $l_1 - \lambda_1 c_1 = l_i - \lambda_1 c_i$ .

Чтобы победить в первом туре, претенденты сообщают минимальные оценки необходимых средств  $c_1$  и  $c_i$ . Во 2-м туре отбора побеждает 1-й претендент, у которого максимальная величина критерия  $l_i - \lambda_1 s_i$ , при этом эффективность конкурса составит 100%.

В рассмотренном выше численном примере величину  $l_1$  можно определить из уравнения:

$$l_1 - \lambda_1 c_1 = l_2 - \lambda_1 c_2.$$

$$\text{Она равна } l_1 = \frac{l_2 - l_1}{c_2 - c_1} = 0.25.$$

С таким значением  $l_1$  в 1-м туре побеждают оба претендента, при условии, что они сообщили минимальные оценки ( $s_1 = 5$ ,  $s_2 = 25$ ). Во 2-м туре победителем становится первый претендент.

Так как не известны точные значения  $c_i$ , то для выбора победителей в 1-м туре необходимо ввести отрезок значений критерия  $[\max_i(l_i - \lambda_1 s_i); \max_i(l_i - \lambda_1 s_i) - \varepsilon]$ .

Все претенденты, у которых значения критериев попадают в этот отрезок, становятся победителями первого тура.

Двухэтапный конкурс обеспечивает максимально возможное сравнение участников по силе и выбор наиболее эффективного участника.

#### *Сложные конкурсы исполнителей*

Рассмотрим сложный конкурс, когда исполнители подбираются для выполнения различных операций проекта.

Пусть  $A_{ij}$  – минимальная цена, по которой  $i$ -й участник берется за операцию  $j$ ,  $P_{ij}$  – цена за выполнение операции, предлагаемая  $i$ -м участником ( $P_{ij} \geq A_{ij}$ ). Руководитель проекта (МП) стремится минимизировать суммарную стоимость реализации всех операций. Пусть каждый участник берется реализовывать только одну операцию. Примем  $x_{ij} = 1$ , если операция  $j$  назначается участнику  $i$  и  $x_{ij} = 0$ , иначе. Математическая модель задачи распределения операций по исполнителям представляется в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{i,j} x_{ij} \times P_{ij} &\rightarrow \min & (2.3.1) \\ \sum_i x_{ij} &= 1, \quad j = 1, \dots, m \\ \sum_j x_{ij} &= 1, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

При этом стоимость  $j$ -ой операции:

$$C_j = \sum_i x_{ij} \cdot P_{ij}.$$

Покажем, что ситуация равновесия Нэша достигается при назначении операций, минимизирующих сумму объективных затрат

$$C = \sum_{i,j} x_{ij} \times P_{ij}. \quad (2.3.2)$$

Доказательство. Пусть  $\{P_{ij}^*\}$  – ситуация равновесия и  $x_{ij} = 1$ . Обозначим  $\Delta_i = P_{ij}^* - A_{ij} = C_i - A_{ij}$ . Если для некоторого  $P_{ik} - A_{ik} > \Delta_i$ , то претендент будет уменьшать  $P_{ik}$ , претендуя на операцию  $k$  с целью обеспечения большего выигрыша, и будет продолжать уменьшение до  $P_{ik} = A_{ik} + \Delta_i$ . При  $P_{ik} < A_{ik} + \Delta_i$  увеличение  $P_{ik}$  до значения  $A_{ik} + \Delta_i$  не меняет назначения. Таким образом, решение задачи (2.3.1) с равновесными значениями  $\{P_{ij}^*\}$  совпадает с решением задачи с величинами  $P_{ij} = A_{ij} + \Delta_i, i, j = \overline{1, n}$ . Примем, наконец, что претенденты, не получившие операций, сообщают минимальные оценки  $P_{ij} = A_{ij}$ , надеясь на получение какой-либо операции. Значит назначение операций, которое минимизирует  $\sum_{i,j} (A_{ij} + \Delta_i) X_{ij}$ , доставляет минимум и величине  $\sum_{i,j} A_{ij} x_{ij}$ . Из этого, однако, не вытекает, что операции назначаются, используя минимальные цены  $A_{ij}$ , так как величины  $\Delta_i$  могут принимать весьма большие значения.

Рассмотрим случай равенства числа участников числу операций.

Пусть  $P = \{P_{ij}\}$  – некоторый набор цен, предлагаемых участниками, а  $x_{ij}(P)$  – решение задачи назначения. При увеличении претендентом цены операций на величину  $P'_{ij} = P_{ij} + \Delta_i, j = \overline{1, n}$ , решение не меняется, и претендент получает эту же операцию по более высокой цене. При этом возникает рост цен. Пусть цена каждой операции ограничивается некоторой лимитной величиной  $L_j$ . Перенумеруем участников таким образом, чтобы в оптимальном решении назначения операций  $P_{ij} = A_{ij}$ , операцию  $i$  получил участник номером  $s_i$ , поэтому  $C_i = P_{ii}$ . Пусть начальные цены будут  $C_i^0 = L_i$ , а начальные оценки  $P_{ij}^0 = L_j, j = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$ . Проведем корректировку цен и оценок по формулам:

$$S_{ij} = \min(L_i, A_{ij} + A_{ii} + C_i), \quad (2.3.3)$$

$$C_{ij} = \min(L_j, S_{ij}). \quad (2.3.4)$$

В результате этой процедуры получаются равновесные оценки  $\{P_{ij}^*\}$  и равновесные цены  $C_i^* = P_{ii}^*, i = \overline{1, n}$ . Важно, что отправной точкой этой процедуры являются лимитные цены. При этом хотя бы одна операция назначается по такой лимитной цене.

Пример 3. Положим  $L_i = L; A_{ii} = a < L; A_{ij} = L, j \neq i$ . В ситуации равновесия  $P_{ij}^* = L$  для всех  $i, j$ . Равновесное решение этой задачи назначения проектов:  $x_{ii}^* = 1; x_{ij}^* = 0, j \neq i; C_i^* = L, i = \overline{1, n}$ . Оценка эффективности конкурсного механизма по отношению минимальной цены всех операций  $P_{\min} = n \cdot a$  к их стоимости в равновесии  $P = L \cdot n$ , будет равна  $K = \frac{P_{\min}}{P^*} = \frac{a}{L} \ll 1$  при  $a \ll L$ .

Пример 4. Значения  $A_{ij}$  для двух операций и двух участников:

$i \setminus j$	1	2
1	15	10
2	25	15

Пусть лимитные цены операций  $L_1 = 120$ ,  $L_2 = 100$ . Найдем равновесные оценки  $P_{ij}^*$  и цены  $C_j^*$ .

$$\begin{aligned}
 P_{21}^0 &= P_{11}^0 = L_1 = 120, \quad P_{12}^0 = P_{22}^0 = 100, \quad C_1^0 = 120, \quad C_2^0 = 100. \\
 P_{12}^1 &= \min[L_2; C_1^0 + A_{12} - A_{11}] = 100, \\
 P_{21}^1 &= \min[L_1; C_2^0 + A_{21} - A_{22}] = 110, \\
 P_{11}^1 &= C_1^1 \min[L_1; P_{21}^1] = 110, \\
 P_{22}^1 &= C_2^1 \min[L_2; P_{12}^1] = 100.
 \end{aligned}$$

Получаем равновесную ситуацию:

$$\begin{aligned}
 P_{11}^* &= P_{21}^* = 110, \quad P_{22}^* = P_{12}^* = 100, \\
 C_1^* &= 100, \quad C_2^* = 100.
 \end{aligned}$$

Получаем в данном случае весьма малую эффективность конкурсного механизма  $K = 30/210 = 1/7$ .

С появлением еще одного участника ситуация существенно меняется. Договорные цены при этом в ситуации равновесия определяют уже не лимитные цены  $\{L_j\}$ , а минимальные цены  $\{A_{ij}\}$ . Покажем, что достаточно большие лимитные цены не влияют на равновесные. Для этого перенумеруем участников таким образом, чтобы участник  $i$  получал проект  $i$ , а  $(m+1)$ -й участник проекта не получал. В этом случае величина  $F_0 = \sum_i A_{ii}$  определяет решение задачи минимизации  $\sum_{i,j} A_{ij} x_{ij}$ .

Как отмечалось выше,  $(m+1)$ -й участник сообщает в равновесной ситуации минимальные цены  $P_{m+1,j} = A_{m+1,j}$ , а остальные претенденты  $P_{ij} = A_{ij} + \Delta_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

$\Delta_i$  находим, решая задачи следующего вида:

$$\sum_{j=1}^m [A_{m+1,j} x_{m+1,j} + \sum_{i \neq k} A_{ij} x_{ij}] \rightarrow \min \quad (2.3.5)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned}
 \sum_j x_{ij} &= 1, \quad i = \overline{1, m+1}, \quad i \neq k, \\
 \sum_{i \neq k} x_{ij} + x_{m+1,j} &= 1, \quad j = \overline{1, m}.
 \end{aligned}$$

Пусть  $F_k$  – оптимальное значение целевой функции при решении задачи (2.3.5),  $F_k \geq F_0$  для всех  $k$ . Пусть  $\Delta_k > F_k - F_0$ . Тогда решение задачи минимизации  $\sum_{i,j} (A_{ij} + \Delta_k) x_{ij}$  не совпадает с решением задачи минимизации  $\sum_{i,j} A_{ij} x_{ij}$ . Поэтому равновесие достигается при  $\Delta_k = F_k - F_0$  и  $P_{ij}^* = A_{ij} + F_i - F_0$ ,  $F_{m+1} = F_0$ .

Эффективность конкурсного механизма определяется выражением:

$$K = \frac{F}{\sum_{i=1}^m F_{i+1} - (m-1)F_0}$$

Поскольку все  $F_i, i = \overline{1, m+1}$  определяются минимальными ценами  $A_{ij}$ , то эффективность конкурсного механизма не зависит от достаточно больших лимитных цен.

Пример 5. В задаче примера 3 добавим еще одного исполнителя, который может выполнять одинаково выгодные для него операции 1 и 2, ( $A_{31} = A_{32} = \alpha$ ). Если  $\beta < \alpha < L$ , то  $F_0 = 2\beta, F_1 = F_2 = \beta + \alpha, \Delta_1 = \Delta_2 = \alpha - \beta$  и эффективность конкурсного механизма  $K = \frac{2\beta}{2\alpha} = \frac{\beta}{\alpha}$ .

Цены операций равны:  $\Pi_1^* = \Pi_2^* = \alpha$ .

Пример 6. Теперь добавим еще одного участника в задачу примера 4 с параметрами  $A_{31} = 40, A_{32} = 20$ . Имеем:

$$A = \begin{pmatrix} 15 & 10 \\ 25 & 15 \\ 40 & 20 \end{pmatrix}$$

$$F_0 = 30, F_1 = 45, F_2 = 35, \Delta_1 = 15, \Delta_2 = 5.$$

Ситуация равновесия:

$$P_{11}^* = 30, P_{21}^* = 30, P_{22}^* = 20, P_{12}^* = 25,$$

$$P_{31}^* = 40, P_{32}^* = 20.$$

Решение  $x_{11}^* = x_{22}^* = 1$ , остальные  $x_{ij} = 0$ , т.е. участник 1 получает операцию 1 по цене  $\Pi_1^* = 30$ , а участник 2 – операцию 2 по цене  $\Pi_2^* = 20$ . Теперь эффективность конкурсного механизма  $K = 30/50 = 0,6$  повысилась в 4, 2 раза по сравнению с предыдущим случаем  $K = 1/7$ .

Данные примеры показывают, как резко увеличивается эффективность конкурсного механизма, если добавляется всего один новый участник.

Максимальная эффективность конкурсного механизма достигается при участии в конкурсе равных соперников, то есть при назначении всех операций по минимальным ценам  $A_{ij} = A_j$  для всех  $i = \overline{1, n}$  и  $F_k = F_0, \Delta_k = 0$ .

При  $n > m + 1$  анализ конкурсного механизма проводим аналогично предыдущему примеру. При этом объем вычислений резко возрастает с ростом  $n$ . Например, при  $n = m + 2$  рассматривается  $C_m^2$  задач, которые получаются путем замены любых двух участников, получивших операции, на других двух участников, которые не получили операции в равновесии.

Обозначим:

$$F_{ij} = \min \sum_s \sum_{k \neq i, j} x_{ks} A_{ks}$$

при условиях

$$\sum_{k \neq i, j} x_{ks} = 1, \quad s = \overline{1, m}$$

$$\sum_s x_{ks} = 1, \quad k \neq i, j.$$

Любое Паретовское решение следующей системы неравенств

$$\begin{cases} \Delta_i + \Delta_j \leq F_{ij} - F_0, i, j = \overline{1, m}, \\ 0 \leq \Delta_i \leq F_i - F_0, i = \overline{1, m}, \end{cases}$$

определяет ситуацию равновесия. Оценка эффективности конкурсного механизма определяется по формуле:

$$K = \frac{F_0}{F_0 + \Delta_{\max}},$$

где  $\Delta_{\max} = \max \sum_i \Delta_i$ .

Пример 7. Добавим четвертого участника к трем из примера 6:

$$A = \begin{pmatrix} 15 & 10 \\ 25 & 15 \\ 40 & 20 \\ 20 & 40 \end{pmatrix}.$$

Имеем:  $F_1 = 35, F_2 = 30, F_{12} = 40, F_0 = 30,$

$\Delta_1 \leq 35 - 30 = 5, \Delta_2 \leq 30 - 30 = 0.$

Ситуация равновесия в данном случае:

$P_{11} = 20, P_{21} = 25, P_{31} = 40, P_{41} = 20;$

$P_{21} = 15, P_{22} = 15, P_{32} = 20, P_{42} = 40.$

Получили 2 варианта назначения операций: в 1-м варианте 1-ю операцию получает 1-й участник, 2-ю операцию получает 2-й участник, а во 2-м варианте 1-ю операцию получает 4-й участник, а 2-ю операцию – 1-й участник.

При увеличении участников до четырех эффективность конкурсного механизма увеличивается до  $K = 0,84 > 0,6$ .

Рассмотренные выше конкурсные механизмы способствуют эффективному определению оптимального состава исполнителей, обеспечивая при этом оптимальное распределение финансирования по операциям проекта.

## Глава 2.4. Распределение ресурсов для выполнения проекта

Важнейшая задача управления организационными системами, в частности управления проектами, заключается в распределении ресурсов. Ресурсами могут выступать сырье, финансы, энергия, трудовые ресурсы, оборудование, вычислительные мощности и т.п. Суммарное количество каждого ресурса зачастую ограничено, поэтому возникает задача оптимального распределения ресурса.

Если в системе с  $n$  исполнителями МП известна эффективность каждого  $i$ -го исполнителя, определяемая функцией предпочтения  $\phi_i(x_i)$ , где  $x_i$  – количество полученного ресурса,  $i = \overline{1, n}$ , то задача оптимального распределения ресурса заключается в максимизации суммарной эффективности исполнителей

$$\sum_{i=1}^n \phi_i(x_i) \rightarrow \max_x, \quad (2.4.1)$$

при условии ограничения на распределяемый ресурс

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq R. \quad (2.4.2)$$

При распределении всего ресурса в объеме  $R$  оптимальное решение поставленной задачи (2.4.1) – (2.4.2) должно удовлетворять уравнению:

$$\frac{\partial \phi_i(x_i^*)}{\partial x_i} = \lambda, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2.4.3)$$

где  $\lambda$  определяется из равенства  $\sum_{i=1}^n x_i^*(\lambda) = R$ .

В ситуации отсутствия достоверной информации об эффективности исполнителей МП вынужден принимать решения о количестве выделяемого ресурса по некоторым сведениям, сообщаемым исполнителями. Но поскольку информация, сообщаемая исполнителями, влияет на объем полученного ими ресурса, то они стремятся к передаче такой информации, которая обеспечила бы им получение максимально выгодного для себя объема ресурса. В общем случае информация от исполнителей может вообще не соответствовать истинной потребности, то есть возникает проблема манипулируемости. Ниже мы рассмотрим возможность построения механизма, обеспечивающего представление исполнителями достоверной информации.

#### *Неманипулируемые механизмы распределения ресурса*

Рассмотрим простейший пример, в котором МП распределяет ресурс между двумя исполнителями. Пусть  $r_i$  – объем ресурса, максимизирующий эффективность  $i$ -го исполнителя ( $i = 1, 2$ ),  $s_1$  и  $s_2$  – объем заявок исполнителей. Если  $s_1 + s_2 \leq R$  и  $r_1 + r_2 \leq R$ , то решение, очевидно,  $x_1 = s_1$ ,  $x_2 = s_2$ . Как распределять ресурс в случае его дефицита при  $s_1 + s_2 > R$ ? В случае ограничения заявок исполнителей:  $0 \leq s_i \leq R$ ,  $i = 1, 2$ , может быть использован следующий механизм, называемый принципом пропорционального распределения:

$$x_i = \eta_i(s_1, s_2) = \frac{s_i}{s_1 + s_2} R, \quad i = 1, 2. \quad (2.4.4)$$

Каждый исполнитель получает при этом количество ресурса, зависящее от заявок обоих исполнителей, то есть имеем игру. МП в этой игре является метаигроком, он выбирает правила – механизм  $\eta(\bullet)$ .

Возможны следующие случаи заявок, которые будут сообщать исполнители:

1. Оба исполнителя стремятся получить максимальное количество ресурса ( $r_1 = +\infty$ ,  $r_2 = +\infty$ ). Равновесные по Нэшу заявки в этом случае равны  $s_1^* = s_2^* = R$ . Действительно, сообщая заявку  $s_i < R$ ,  $i$ -му исполнителю будет выделено меньшее количество ресурса, чем исполнителю  $j \neq i$  ( $s_j = s_j^* = R$ ). В этом случае  $x_1^* = \eta_1(s_1^*, s_2^*) = x_2^* = \eta_2(s_1^*, s_2^*) = R/2$ . Очевидно, что равновесие не изменится при  $r_1 > R/2$ ,  $r_2 > R/2$ .

2. Пусть теперь  $r_1 \leq R/2$ ,  $r_2 > R/2$ . В этом случае решение, очевидно, будет  $s_2^* = R$  и  $s_1^* = r_1/(R-r_1)$ . При этом  $x_1^* = r_1$ ,  $x_2^* = R-r_1$ , то есть первый исполнитель определяет решение, он является «диктатором».

Значение  $R/2$  имеет очень важный смысл, а именно  $R/2 = \eta_i(R, R)$ . Это количество ресурса, которое получают оба исполнителя в случае сообщения максимальных заявок.

При этом равновесные заявки не совпадают с истинными потребностями исполнителей, т.е. этот механизм является манипулируемым. Ниже рассмотрим механизм, позволяющий избавиться от такого манипулирования.

Пусть исполнители сообщают МП вместо заявок  $s_i \in [0, R]$  оценки  $\tilde{r}_i$  параметров  $r_i$  своих функций предпочтения  $\phi_i(x_i)$ . На основании этих оценок  $\{\tilde{r}_1, \tilde{r}_2\}$ ,  $\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 > R$  МП определяет равновесную точку  $(s_1^*(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2), s_2^*(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2))$  по следующей процедуре:

1. Если для  $\forall i \tilde{r}_i > R/2$ , то  $s_1^* = s_2^* = R$ .
  2. Если один исполнитель имеет  $\tilde{r}_i \leq R/2$ , у другого  $\tilde{r}_j > R/2$ ,  $j \neq i$ , то  $s_i^* = r_i/(R-r_i)$ ,  $s_j^* = R$ .
- Если же  $\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 \leq R$ , то  $s_1^* = \tilde{r}_1$ ,  $s_2^* = \tilde{r}_2$ .

Затем МП распределяет ресурс в соответствии с (2.4.4). В данном прямом механизме исполнители получают такое же количество ресурса, как в исходном механизме, следовательно, эти механизмы имеют одинаковую эффективность. Проверим теперь, является ли предложенный эквивалентный механизм неманипулируемым, а именно, определяют ли сообщения  $\tilde{r}_i \equiv r_i$ ,  $i = 1, 2$ , равновесие Нэша. Возможны три случая:

1. Если оба исполнителя имеют  $r_i > R/2$ , то при  $\tilde{r}_i \equiv r_i$  они получают по половине ресурса. Если же  $\tilde{r}_i < R/2$ , то  $x_i^* < R/2$  и эффективность исполнителя  $i$  уменьшится.

2. Если  $r_i \leq R/2$ , то  $i$ -й исполнитель получает оптимальное количество ресурса  $r_i$ , отклонение ему невыгодно.  $j$ -й исполнитель ( $i \neq j$ ) получает в этой ситуации меньше необходимого количества ресурса, отклонение ему также невыгодно, потому что при сообщении  $\tilde{r}_j < r_j$  полученное количество ресурса не увеличится, так как МП «восстановит»  $s_j^*(r_i, \tilde{r}_j) \leq R$ .

3. При  $r_1 + r_2 \leq R$ ,  $x_1 = r_1$ ,  $x_2 = r_2$  исполнители получают оптимальное количество ресурса и им невыгодно искажать информацию.

Таким образом, в рассматриваемом примере был построен прямой неманипулируемый механизм распределения ресурса, имеющий такую же эффективность, как и в исходном механизме. Обобщим теперь этот результат на произвольный механизм распределения ресурса. Пусть МП должен распределить ресурс в количестве  $R$  между  $n$  исполнителями с функциями предпочтения  $\phi_i(x_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Предположим, что заявки исполнителей ограничены:  $s_i \leq D_i$ ,  $\forall i$ ;  $\{r_i\}$  – точки максимума функций  $\phi_i(x_i)$ ,  $\sum_{i=1}^n r_i > R$ . Пусть процедура распределения  $x_i = \eta_i(s_1, \dots, s_n)$ , которую использует МП, удовлетворяет следующим условиям:

1. Весь ресурс распределяется полностью, то есть  $\sum_{i=1}^n \eta_i(s_1, \dots, s_n) = R$  при  $\sum_{i=1}^n s_i > R$ .

2. При получении исполнителем некоторого количества ресурса, оно всегда может быть уменьшено.

3. Если количество ресурса  $R$ , распределяемое МП, увеличивается, то все исполнители при той же процедуре распределения получают в равновесии не меньше, чем прежде.

Перечисленные выше условия механизма распределения ресурса являются достаточно естественными, им удовлетворяют большинство практически используемых механизмов.

Множество всех исполнителей  $I$  разобьем на два подмножества:  $P$  и  $Q$  ( $P \cap Q = \emptyset$ ;  $P \cup Q = I$ ). Приоритетные потребители  $P$  (диктаторы) характеризуются тем, что они все получают оптимальное количество ресурса. Исполнители из множества  $Q$  получают количество ресурса, меньшее оптимального, то есть  $x_i(s^*) < r_i$ ,  $i \in Q$ , где  $s^*$  – равновесные заявки. Очевидно, что  $s_i^* = D_i$ ,  $\forall i \in Q$ . Рассмотрим теперь прямой механизм, который использует сообщенные исполнителями оценки  $\tilde{r}_i$ .

Достаточно определить множество приоритетных потребителей. Для этого предлагается использовать следующий алгоритм:

1. Положим  $P = \emptyset$ ,  $Q = I$ , предположим, что исполнители сообщили свои максимальные заявки  $D = (D_1, \dots, D_n)$ . Если  $x_j(D) \geq \tilde{r}_j$ , то  $P := P + \{j\}$ .

2. Полагаем  $s_i = D_i \forall i \in Q$  и между ними распределяем ресурс  $R = \sum_{j \in P} \tilde{r}_j$ .

При появлении новых приоритетных потребителей, включаем их в  $P$  и повторяем шаг 2.

Данный алгоритм сходится при конечном числе шагов. Его содержательная интерпретация заключается в следующем. На первом шаге МП распределяет ресурс между всеми исполнителями, при условии, что они сообщили свои максимальные заявки. Если какой-то исполнитель в этом случае получает больше, чем  $r_j$ , то излишек ресурса ( $x_j(D) - \tilde{r}_j$ ), в силу свойств 2–3 механизма  $\eta(\bullet)$ , распределяется между исполнителями, которым ресурса не хватило. Далее приоритетные исполнители получают оптимальное количество ресурса, при этом остальные исполнители остаток делят между собой.

Приведенный выше алгоритм определяет прямой механизм, использующий сообщение  $\{\tilde{r}_j\}$  и приводящий к распределению ресурса, как и в исходном механизме  $\eta$ , и имеющий ту же эффективность.

Таким образом, мы показали, что оптимальный механизм входит в класс неманипулируемых механизмов, при строительстве этого механизма все исполнители сообщают правдивую информацию, при этом МП не теряет эффективности.



### Приоритетные механизмы

Приоритетные механизмы используют показатели приоритета исполнителей и в общем случае описываются процедурой:

$$x_i(s) = \begin{cases} s_i, & \text{если } \sum_{j=1}^n s_j \leq R \\ \min\{s_i, \gamma \eta_i(s_i)\}, & \text{если } \sum_{j=1}^n s_j > R \end{cases}, \quad (2.4.5)$$

где  $n$  – количество исполнителей,  $x_i$  – выделяемое количество ресурса,  $\{s_i\}$  – их заявки,  $\eta_i(s_i)$  – функции приоритета исполнителей,  $R$  – распределяемое количество ресурса,  $\gamma$  – некоторый параметр. Нормировочный параметр  $\gamma$  выбирается из условия, заключающегося в выполнении бюджетного ограничения:

$$\sum_{i=1}^n \min\{s_i, \gamma \eta_i(s_i)\} = R,$$

обеспечивающего распределение всего ресурса  $R$ .

Приоритетные механизмы делятся на 3 класса – механизмы прямых приоритетов (где  $\eta_i(s_i)$  – возрастающая функция  $s_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ), механизмы абсолютных фиксированных приоритетов, не зависящие от сообщаемых заявок, и механизмы обратных приоритетов (где  $\eta_i(s_i)$  – убывающая функция  $s_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ). Далее последовательно рассмотрим механизмы прямых и обратных приоритетов.

#### Механизмы прямых приоритетов

В случае строго возрастающих функций предпочтения  $\phi(x_i)$ , все исполнители стремятся сообщать на ресурс максимальные заявки. Эти механизмы прямых приоритетов, основанные на принципе «кто больше просит – тот больше получает» справедливо подвергались и подвергаются критике.

При наличии максимума функций предпочтения исполнителей в точках  $\{r_i\}$ , анализ усложнится, но качественный вывод прежний – при малейшем дефиците  $\Delta = \sum_{i=1}^n r_i - R$  наблюдается рост заявок.

Рассмотренная ранее в качестве примера процедура прямых приоритетов ( $\eta_i(s_i) = s_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;  $\gamma = R / \sum_{i=1}^n s_i$ ), является процедурой пропорционального распределения, относящейся к механизмам прямых приоритетов.

#### Механизмы обратных приоритетов

В механизмах обратных приоритетов  $\eta_i(s_i)$  – убывающая функция  $s_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , обладающая существенными преимуществами по сравнению с механизмом прямых приоритетов. Пусть механизм обратных приоритетов основан на функциях приоритетов:

$$\eta_i(s_i) = \frac{A_i}{s_i}, \quad i = 1, n, \quad (2.4.6)$$

где  $\{A_i\}$  характеризуют потери проекта, если исполнитель  $i$  не получает ресурса. Отношение  $A_i/s_i$  определяет эффект от использования ресурса  $i$ -м

исполнителем. Таким образом, механизмы обратных приоритетов распределяют ресурс пропорционально эффективности.

Пусть имеются 3 исполнителя,  $A_1 = 4$ ;  $A_2 = 16$ ;  $A_3 = 9$ ;  $R = 18$ . Определим равновесие Нэша в случае стремления исполнителей получить максимальное количество ресурса. Функция  $x_i(s) = \min\{s_i, \gamma(A_i / s_i)\}$  имеет максимум в точке, удовлетворяющей  $s_i = \gamma(A_i / s_i)$ . Имеем  $x_i^* = s_i^* = \sqrt{\gamma A_i}$ . Параметр  $\gamma$  определим из ограничения  $\sum_{i=1}^n x_i^* = \sqrt{\gamma} \sum_{i=1}^n \sqrt{A_i}$ . Получим  $\gamma = \left(R / \sum_{i=1}^n \sqrt{A_i}\right)^2$ . В рассматриваемом примере  $\gamma = 4$ , а равновесные заявки, определяются из условия:

$$x_i^* = s_i^* = R \frac{\sqrt{A_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{A_j}}, \quad (2.4.7)$$

и равны  $s_1^* = 4$ ;  $s_2^* = 8$ ;  $s_3^* = 6$ . Покажем, что это равновесие Нэша. Если первый исполнитель уменьшит свою заявку:  $s_1 = 3 < s_1^*$ , то  $s_1 + s_2^* + s_3^* < R$ . Следовательно,  $x_1 = s_1 = 3 < x_1^*$ . Если же  $s_1 = 5 > s_1^*$ , то  $\gamma \approx 4, 5$ ,  $x_1 = 4 \equiv x_1^*$ . Следовательно, (2.4.7) – равновесие Нэша.

В [2] показано, что стратегии вида (2.4.7) являются гарантирующими для исполнителей, то есть доставляют максимум их эффективности при любых стратегиях остальных [4, 5].

При достижении максимума функций предпочтения исполнителей в точках  $\{r_i\}$ , то при  $s_i^* > r_i$   $i$ -й исполнитель может заказать ровно  $r_i$  и столько же получить, так как уменьшение заявки увеличивает его приоритет. Таким образом, выделяются приоритетные исполнители [5].

В [2] показано, что механизм обратных приоритетов с функцией штрафов за несовпадение планируемого и ожидаемого эффекта при большом числе исполнителей является оптимальным по суммарной эффективности.

#### *Конкурсные механизмы*

Важным условием повышения эффективности управления являются механизмы управления, побуждающие исполнителей к максимуму использования своих резервов, включению в соревнование (конкурс). Широкую распространенность поэтому получили конкурсные механизмы, в которых исполнители участвуют в конкурсе по получению ресурса, участию в проекте, льготных условий финансирования.

В механизмах обратных приоритетов распределение ресурса производилось пропорционально эффективности его использования исполнителями  $\xi_i = \phi_i(x_i)/x_i$ . Конкурсный механизм обеспечивает получение ресурса только победителям, всем исполнителям ресурса может не хватить.

Участниками конкурса сообщаются МП две величины:  $s_i$  – заявка на ресурс и  $\xi_i$  – оценка ожидаемой эффективности его использования. Упорядочим исполнителей по убыванию эффективностей:

$$\xi_1 \geq \xi_2 \geq \dots \geq \xi_n. \quad (2.4.8)$$

Так как исполнители могут завязать оценки  $\xi_i$  для получения финансирования, то при использовании конкурсного механизма МП должен организовать строгую систему контроля выполнения взятых обязательств. Определим функцию штрафов, пропорциональную величине отклонения ожидаемой эффективности  $\xi_i s_i = w_i$  от реальной  $-\phi_i(s_i)$ :

$$c_i = a(\xi_i s_i - \phi_i(s_i)), a > 0, i = \overline{1, n}. \quad (2.4.9)$$

Отметим, что исполнитель платит штраф, если  $\xi_i s_i > \phi_i(s_i)$ , в противном случае штраф равен нулю. Величина  $(\xi_i s_i - \phi_i(s_i))$  соответствует обману, который сознательно совершает исполнитель для победы в конкурсе. Исполнитель имеет целевую функцию следующего вида:

$$f_i(\phi_i, \xi_i) = \mu \phi_i(s_i) - \alpha[\xi_i s_i - \phi_i(s_i)], i = \overline{1, n}, \quad (2.4.10)$$

где  $\mu \phi_i(s_i)$  – доход исполнителя.

Имеющийся в распоряжении МП ресурс  $R$  распределяется в порядке убывания эффективностей в полном запрашиваемом объеме  $s_i$ , пока он весь не закончится. Победителями конкурса называются исполнители, которые получили ресурс в полном объеме.

Таким образом, победа в конкурсе связана только с величиной эффективности  $\xi_i$  и не зависит от объема заявки  $s_i$ .

Пусть исполнители, победившие в конкурсе, имеют номера  $j = \overline{1, m}$ , остальные исполнители ресурса не получают. Можно показать, что все победившие участники сообщают одинаковые оценки  $\xi_j^* = \xi^*, j = \overline{1, m}$ . В [2] показано, что конкурсные механизмы обеспечивают получение оптимального распределения ресурса при наличии общих функций штрафов.

#### *Децентрализованные механизмы распределения ресурса*

В больших проектах, распределяя ресурс между большим количеством исполнителей, МП должен обработать огромный объем информации о потребностях исполнителей, об их эффективности и т.п. В такой ситуации необходимо в систему управления ввести дополнительные уровни, разбить исполнителей на несколько групп, во главе которых поставить менеджера подпроекта. Организационная структура подобного проекта представлена на рис. 2.4.1.

Верхний уровень иерархии занимает МП.  $N$  исполнителей нижнего уровня составляют  $n$  непересекающихся групп (в каждой  $i$ -й группе число исполнителей  $n_i, \sum_{i=1}^n n_i = N, i = \overline{1, n}$ ). На среднем уровне находятся менеджеры подпроектов  $МП_i$ , которым подчиняются исполнители  $i$ -ой группы. На рис. 2.4.1 приведена простая веерная структура, связи между элементами иерархии в которой могут быть в общем случае более сложными (может быть матричная структура с двойным подчинением исполнителей и т.д.).

Сформулируем задачу распределения ресурса в иерархической системе управления. МП распределяет  $R$  единиц ресурса между менеджерами под-

проектов, они, в свою очередь, распределяют его между исполнителями. Может ли децентрализация управления снизить эффективность?

Например:

Имеются  $N$  исполнителей  $I$ , разбитые на две группы –  $I_1$  и  $I_2$  ( $I_1 \cup I_2 = I$ ;  $I_1 \cap I_2 = \emptyset$ ). Каждый исполнитель имеет функцию эффективности следующего вида:

$$\phi_i(x_i) = x_i - \frac{1}{2r_i} x_i^2, i = \overline{1, n} \quad (2.4.11)$$

где  $r_i$  – оптимальное для исполнителя  $i$  количество ресурса. Если МП точно знает функции эффективности для всех исполнителей, то оптимальное распределение ресурса, обеспечивающее максимум суммарной эффективности исполнителей с учетом (2.4.11) имеет вид:

$$x_i^* = \frac{r_i}{\sum_i r_i} R, i = \overline{1, n}, \quad (2.4.12)$$

то есть, получаем распределение ресурса пропорционально максимальным эффективностям (максимум (2.4.11) равен  $r_i/2$  и достигается при  $x_i = r_i$ ). Обозначим  $B = \sum_i r_i$ . Эффективность механизма будет равна:

$$\mathcal{E}^* = \sum_i \phi_i(x_i^*) = R \left[ 1 - \frac{R}{2B} \right]. \quad (2.4.13)$$

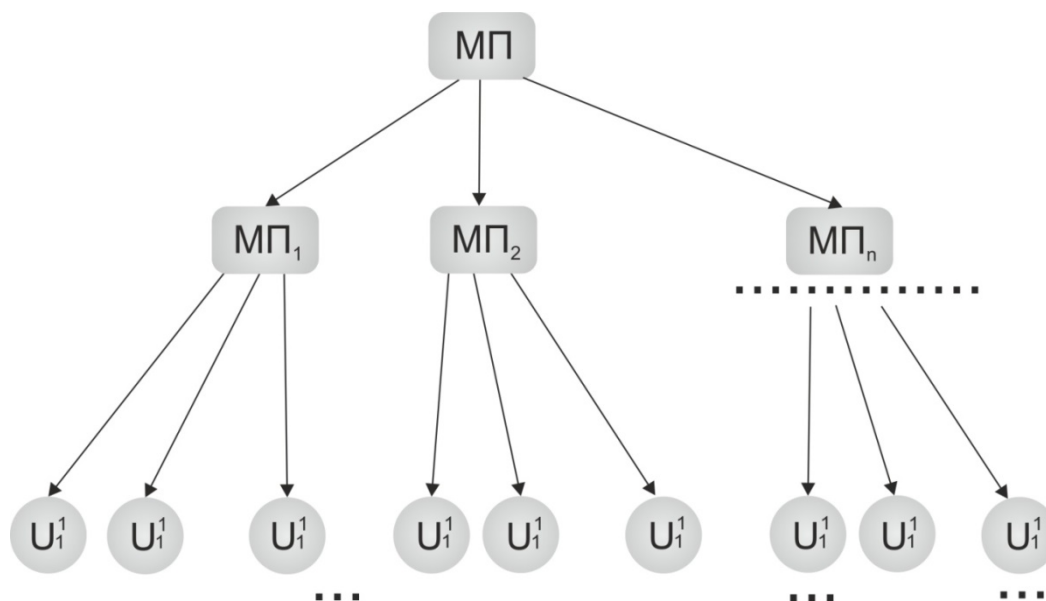


Рис. 2.4.1. Простая веерная структура

При использовании МП децентрализованной структуры управления, исполнители разбиваются на две группы и во главе их ставятся МП<sub>1</sub> и МП<sub>2</sub>. Распределение ресурса тогда заключается в выделении МП<sub>1</sub> и МП<sub>2</sub> ресурса в объемах  $R_1$  и  $R_2$ , соответственно, ( $R_1 + R_2 = R$ ), и дальнейшего распределения менеджерами подпроектов своих ресурсов между своими подчиненными, максимизируя их суммарную эффективность.

Следовательно, каждый из МП<sub>i</sub> ( $i = 1, 2$ ) решает оптимизационную задачу и получает решение следующего вида:

$$x_j^* = \frac{r_j}{\sum_{j \in I_k} r_j} R_k, \quad j \in I_k, \quad k = 1, 2. \quad (2.4.14)$$

Расчет эффективности групп исполнителей производится по формулам:

$$\Theta_1 = R_1 \left[ 1 - \frac{R_1}{2B_1} \right]; \quad \Theta_2 = R_2 \left[ 1 - \frac{R_2}{2B_2} \right], \quad (2.4.15)$$

где  $B_k = \sum_{j \in I_k} r_j$ ,  $k = 1, 2$ ,  $B_1 + B_2 = B$ .

Сравнивая эффективность (2.4.13) и сумму эффективностей  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ , полученных в децентрализованном механизме, видим, что

$$\Theta_1 + \Theta_2 \leq \Theta^*, \quad (2.4.16)$$

Причем равенство в (2.4.16) достигается при:

$$R_i = \frac{B_i}{B} R, \quad i = 1, 2. \quad (2.4.17)$$

Таким образом, распределение ресурса между подгруппами производится пропорционально максимуму их суммарной эффективности, при этом от децентрализации управления не происходит потерь эффективности.

Простейшая модель, рассмотренная в настоящем примере, может быть обобщена для произвольного числа групп. Централизация механизма управления при распределении ресурса существенно разгружает менеджер проекта, не повышая эффективности. При этом распределение ресурса между группами при полной информированности следует производить пропорционально максимальной эффективности.

Рассмотрим теперь децентрализованный механизм распределения ресурса в предположении, что менеджер проекта и менеджерам подпроектов не известны функции предпочтения исполнителей. Тогда менеджер проекта вынужден использовать механизм с сообщением заявок исполнителями.

Рассмотрим пример. Пусть менеджер проекта использует принцип распределения ресурса  $R$  пропорционально заявкам исполнителей  $s_i$  между  $N$  исполнителями:

$$x_i = \frac{s_i}{S} R, \quad i = \overline{1, N},$$

где  $S = \sum_{i=1}^N s_i$  – сумма заявок. Ранее мы установили, что при ограниченных заявках ( $s_i \leq D$ ,  $i = \overline{1, N}$ ) существует эквивалентный прямой манипулируемый механизм.

Пусть  $N$  исполнителей разбиты на  $n$  групп ( $\bigcup_{i=1}^n I_i = I, I_i \cap I_j = \emptyset, i \neq j$ ), во главе каждой  $i$ -ой группы стоит свой МП<sub>i</sub>, и исполнители сообщают ему свои заявки, а не непосредственно менеджер проекта. Пусть  $s^j = \sum_{i \in I_j} s_i^j$ ,  $j = \overline{1, n}$  – суммарная заявка  $j$ -й группы ( $s_i^j$  – заявка исполнителя  $i$ , входящего в группу  $j$ ). Предположим, что МП<sub>i</sub> использует также принцип пропорционального распределения:

$$x_i^j = \frac{s_i^j}{s^j R^j}, \quad i \in I_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.4.18)$$

где  $R^j$  – объем ресурса, распределяемого в  $j$ -ой группе. Объемы величин  $R^1, R^2, \dots, R^n$  ( $R^1 + R^2 + \dots + R^n = R$ ) определяет МП на основе заявок  $\{S^j\}$ , подаваемых МП $_j$ . Исполнители, таким образом, сначала сообщают заявки своим начальникам МП $_j$ , а те, в свою очередь, передают МП суммарные заявки своей группы. Если МП, распределяя ресурс  $R$  между менеджерами подпроектов, также применяет принцип пропорционального распределения

$$R^j = \frac{s^j}{S} R, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.4.19)$$

то каждый из исполнителей получает в этом децентрализованном механизме количество ресурса, в точности совпадающее с (2.4.17). Таким образом, мы показали, что агрегирование информации (цепочка исполнитель – МП $_i$  – МП) дает такое же распределение, как и в исходной системе, что, несомненно, является достоинством этого механизма.

## Глава 2.5. Механизмы распределения затрат

Задача распределения затрат является в некотором смысле двойственной к выше рассмотренной задаче распределения ресурса.

Предположим, что исполнители заинтересованы в производстве или покупке некоторого количества общественного блага. Общественным благом может быть производственное оборудование, новая технология, информация, эксперт и т.п. Термин «общественное» означает, что пользоваться им может каждый исполнитель. Цена такого блага фиксирована, поэтому, чтобы произвести его или купить, исполнителям необходимо объединить усилия (затраты). От потребления блага каждый исполнитель получает некоторый доход. Задача заключается в распределении общих затрат между исполнителями, исходя из знания «степени удовлетворения» исполнителей от использования общественного блага. При этом могут быть реализованы разные принципы распределения затрат – пропорционально потребности, поровну и т.п. Если затраты исполнителей зависят от их сообщений, то они, очевидно, постараются заплатить поменьше других. Следовательно, в этом случае возникает проблема манипулируемости.

Например, два города, разделенные рекой, обратились в строительную фирму, занимающуюся строительством мостов. Фирма предлагает построить мост стоимостью  $C$ . Пусть доходы городов от пользования мостом равны  $q_1$  и  $q_2$ . Строительство моста выгодно для городов при  $q_1 + q_2 > C$ . Как же необходимо поделить затраты, то есть, какую сумму заплатит первый город –  $C_1$ , а какую второй –  $C_2$  ( $C_1 + C_2 = C$ )? Рассмотрим возможные варианты.

1. Принцип равного распределения. Пусть  $C_1 = C_2 = C/2$ . Если  $q_1 > C/2$  и  $q_2 > C/2$ , то целевые функции

$$F_i = q_i - C_i > 0, \quad i = 1, 2, \quad (2.5.1)$$

и этот вариант допустимый. При этом он является неманипулируемым (исполнители ничего не сообщают). Однако при  $q_1 \neq q_2$  будет несправедливо поровну платить исполнителям.

2. Принцип пропорционального распределения. Пусть  $s_i$  – сообщаемая МП оценка дохода исполнителя  $i$ ,  $S = s_1 + s_2$ . Разделим затраты пропорционально оценкам дохода:

$$C_i = \frac{s_i}{S} C, \quad (2.5.2)$$

Очевидно, что

$$s_1 + s_2 > C, \quad (2.5.3)$$

иначе строительство моста невыгодно. Потребуем, чтобы целевые функции (2.5.1) были неотрицательны:

$$C_1 \leq q_1; \quad C_2 \leq q_2. \quad (2.5.4)$$

Соотношения (2.5.2)–(2.5.4) задают допустимую область заявленных оценок  $(s_1, s_2)$ , заштрихованную на рис. 2.5.1. При построении рисунка взяты  $q_1 = 0.4$ ,  $q_2 = 1.2$  и  $C = 1$ .

Так как функция (2.5.2) монотонно возрастает по  $s_i$ , а функция (2.5.1) монотонно убывает по  $C_i$ , то исполнители будут стремиться уменьшить заявки. Изображенный на рис. 2.5.1 отрезок АВ соответствует множеству пар заявок  $(s_1^*, s_2^*)$ , которые определяют равновесие Нэша (действительно, если  $i$ -й исполнитель увеличивает  $s_i$ , то увеличиваются его затраты; если он уменьшает  $s_i$ , то останавливается строительство моста, становится невыгодным в силу (2.5.3)–(2.5.4)).

Покажем, что механизм пропорционального распределения формирует равные рентабельности. Обозначим рентабельность  $i$ -го исполнителя как отношение его оценки прибыли  $s_i$  к затратам:  $r_i = (s_i - C_i)/C_i$ . Подставляя это выражение в (2.5.2), получаем  $r_1 = r_2$ , хотя истинные рентабельности,  $(q_i - C_i)/C_i$  могут быть и неравными.

3. Принцип равных значений прибыли. Пусть распределение производится по следующему механизму:

$$C_1 = \frac{C}{2} + \frac{s_1 - s_2}{2}; \quad C_2 = \frac{C}{2} + \frac{s_2 - s_1}{2}. \quad (2.5.5)$$

Исходя из ограничений (2.5.3)–(2.5.4) и стремления исполнителей манипулировать стоимостями  $C_i$  получаем, что множество равновесных точек Нэша опять составляет отрезок АВ на рис. 2.5.1. Отметим, что использование данного механизма уравнивает прибыли исполнителей, которые вычисляются по  $(s_1, s_2)$ .

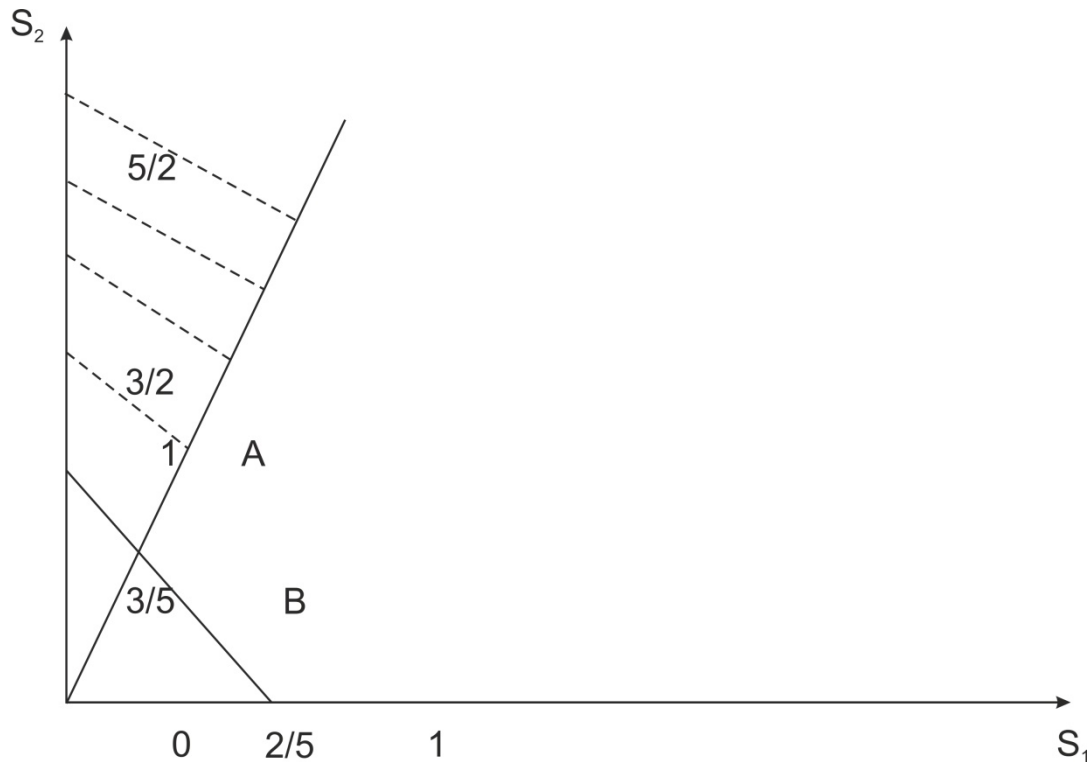


Рис. 2.5.1. Допустимая область заявленных оценок

Принципы распределения затрат, приведенные выше, легко обобщаются для любого числа исполнителей, и они не исчерпывают всех возможных вариантов – сегодня используются десятки различных принципов [9]. Большинство из них оставляет открытым вопрос о манипулируемости. Рассмотрим частный случай.

В главе 2.1 мы показали, в любом механизме распределения ресурса имеется неманипулируемый механизм такой же эффективности. Перенесем этот результат на механизмы распределения затрат, рассмотренные выше.

Имеются  $n$  исполнителей с целевыми функциями

$$F_i = q_i - \phi_i(C_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.5.6)$$

где  $q_i$  – доход  $i$ -го исполнителя при пользовании блага,  $C_i$  – его вклад,  $\phi_i(C_i)$  – затраты. Пусть  $\phi_i(\bullet)$  имеет единственный минимум в точке  $r_i$ . Вклад исполнителя  $i$  определяет МП на основании заявок  $\{s_i\}$ :  $C_i = \eta_i(s_1, s_2, \dots, s_n)$ , где  $\eta_i(\bullet)$  – строго монотонна по  $s_i$ . Значение  $s_i$  интерпретируется как оценка  $i$ -го исполнителя справедливого (с его точки зрения) вклада за использование общественного блага.

Пусть заявки исполнителей удовлетворяют неравенствам  $s_i \geq d_i, i = \overline{1, n}$ . На основании этих заявок  $\{s_i\}$  необходимо распределить затраты  $\{C_i\}$  так, чтобы  $\sum_{i=1}^n C_i = C$ , где  $C$  – общие затраты на реализацию общественного продукта. Определим размеры заявок, которые будут сообщать исполнители (аналогично механизмам распределения ресурса). Пусть  $s^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)$  – равновесные заявки, тогда при  $\eta_i(s^*) > r_i$   $s_i^* = d_i$ , при  $s_j^* > d_j$   $\eta_j(s^*) = r_j$ .



Подобно механизму распределения ресурса, зависящему от  $\{r_i\}$  – множества идеальных точек, алгоритм определения равновесия будет следующим:

1. Определим затраты по формуле  $s_i^* = d_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Если у элемента  $j$   $\eta_j(s) < r_j$ , полагаем  $C_j = r_j$ , а разницу  $(r_j - \eta_j(s))$  перераспределим между остальными исполнителями.

2. Будем повторять эту процедуру, пока не получим два непересекающихся подмножества исполнителей – приоритетные (вносящие «справедливую» по их мнению сумму) и остальные (сообщающие в равновесии минимальную заявку).

Эквивалентный прямой механизм заключается в сообщении исполнителями своего мнения  $\{\tilde{r}_i\}$  о справедливом распределении, после чего МП на основании этих оценок вычисляет  $s^*(\tilde{r})$  по приведенному выше алгоритму. Легко показать, что в этом механизме передача достоверной информации является равновесием Нэша, таким образом, он является неманипулируемым.

Мы показали, что в рассмотренной модели (при (2.5.6) и без ограничений (2.5.3)–(2.5.4)) в любом прямом механизме распределения затрат существует неманипулируемый механизм равной эффективности.

## Глава 2.6. Финансирование проекта

### *Кредитование и смешанное финансирование*

Как правило, большие проекты финансируются из многих источников. Инициаторы проекта стремятся привлечь бюджетные средства, средства частных фирм, различные фонды и т.п. Задача финансирования относится в этом случае к задачам распределения затрат, рассмотренным в предыдущей главе.

Сначала рассмотрим механизм смешанного финансирования проектов. Допустим, что имеется  $n$  видов региональных проектов (охраны окружающей среды, социальной защиты, строительства дорог и т.п.), на реализацию которых привлекаются средства различных частных фирм. Но проекты бывают невыгодны экономически частным фирмам, если эффект от них (отдача на единицу затрат) меньше единицы. Обозначим эффект на единицу вложенных средств в проекты для фирмы  $i$  через  $a_i$  ( $a_i < 1$ ,  $i = \overline{1, n}$ ).

В силу ограниченности регионального бюджета, его бывает явно недостаточно для реализации заданного числа проектов, и в этом случае привлекаются частные фирмы, которые желают получить деньги из бюджета или льготный кредит. Смешанное финансирование заключается в выдаче бюджетных средств или льготного кредита при условии выделения фирмой на проект и собственного финансирования. На практике, как правило, фиксируется доля средств, выделяемая фирмой (например, 30% средств из бюджета, а 70% – собственные средства фирмы). При малой доле бюджет-

ных средств незначительным будет и объем частных вложений, а при большой доле, во-первых, будет очень много желающих инвестировать собственные средства, поэтому придется проводить дополнительный конкурсный отбор, а, во-вторых, уменьшится эффективность пользования бюджетными средствами. Ниже рассмотрим механизм смешанного финансирования при гибко настраиваемой величине доли бюджетного финансирования.

Формальная постановка задачи создания механизма смешанного финансирования заключается в следующем. Имеются  $n$  фирм – возможных инвесторов в программы развития региона. Есть также централизованный фонд для финансирования этих программ. Каждая фирма  $i$  предлагает для включения в программу проект, требующий финансирования  $S_i$ . Проекты проходят экспертизу, которая определяет их социальную ценность  $F_i(S_i)$ . Кроме социальной ценности, проект, предлагаемый фирмой, имеет экономическую ценность для фирмы  $\phi_i(S_i)$ . На основании этих заявок руководство региона определяет объемы финансирования каждой фирмы  $\{x_i\}$ ,  $x_i \leq S_i$ , учитывая ограниченный объем бюджетных средств  $R$ . Назначение  $x_i = \eta_i(S)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , есть механизм смешанного финансирования. При этом недостающие средства  $y_i = S_i - mx_i$  обеспечивает фирма за свой счет. Интересы фирмы, таким образом, описываются выражением:

$$\phi_i(S_i) - y_i, \quad (2.6.1)$$

где  $\phi_i(S_i)$  – доход  $i$ -й фирмы (учитывая процент за кредит, если фирма берет его в банке). Задача заключается в разработке механизма  $\eta(S)$ , обеспечивающего максимальный социальный эффект:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n F_i(S_i^*),$$

где  $S^* = \{S_i^*\}$  – точка равновесия Нэша.

В линейном случае, при  $F_i(S_i) = b_i S_i$ ,  $\phi_i(S_i) = a_i S_i$ ,  $b_i > 0$ ,  $0 < a_i < 1$ ,  $i = \overline{1, n}$ , механизм прямых приоритетов имеет вид

$$x_i(\bar{S}) = \frac{l_i S_i}{\sum_j l_j S_j} R, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2.6.2)$$

где  $\bar{S} = (S_1, S_2, \dots, S_n)$ ,  $l_i$  – приоритет  $i$ -й фирмы. Пусть  $R = 1$ . Если  $x_i(S) > S_i$  (фирма средств получает больше заявленного), то в этом случае  $x_i(S) - S_i$  остается у фирмы.

Для определения ситуации равновесия Нэша подставим (2.6.2) в (2.6.1) и найдем максимум по  $S_i$  выражения:

$$a_i S_i - \left( S_i - \frac{l_i S_i}{L(S)} \right) = \frac{l_i S_i}{L(S)} - (1 - a_i) S_i, \quad \text{где } L(S) = \sum_i l_i S_i.$$

Произведя несложные вычисления, получим:

$$l_i S_i = L(S) [1 - q_i L(S)], \quad \text{где } q = \frac{1 - a_i}{l_i}.$$

Из выражения

$$\sum_i l_i S_i = L(S)$$

находим

$$L(S^*) = \frac{n-1}{Q} \quad \text{и} \quad S_i^* = \frac{(n-1)}{l_i Q} \left[ 1 - \frac{(n-1)q_i}{Q} \right]. \quad (2.6.3)$$

где  $Q = \sum_i q_i$ . При этом выполняется условие  $S_i^* \geq 0$  или

$$\frac{q_i}{Q} < \frac{1}{n-1}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.6.4)$$

При нарушении этого условия соответствующие фирмы из состава претендентов выбывают. С новыми значениями  $n$  и  $L$  вычисления повторяются, пока не получим равновесную ситуацию, при которой для всех фирм выполняется (2.6.4). Упорядочим фирмы по возрастанию  $q_i$ , ( $q_1 \leq q_2 \leq \dots \leq q_n$ ). Число фирм-претендентов для участия в программах развития региона определяется как максимальное  $k$ , удовлетворяющее неравенству  $q_i < \frac{Q_k}{k-1}$ , где  $Q_k = \sum_{i=1}^k q_k, i = \overline{1, k}$ .

Пример 1. Значения  $q_i, l_i$  и  $a_i$  приведены в таблице.

	1	2	3	4	5	6
$q_i$	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 5	0, 6
$l_i$	1	2	3	2, 2	0, 5	1, 5
$a_i$	0, 9	0, 6	0, 1	0, 12	0, 75	0, 1

Определим максимальное  $k$ . Получаем:

$$\frac{q_1+q_2}{1} = 0,3 > q_2 = 0,2,$$

с другой стороны

$$\frac{q_1+q_2+q_3}{2} = 0,3 = q_3 = 0,3,$$

то есть  $k = 2$ , значит, первые две фирмы являются претендентами на участие в программе со смешанным финансированием. При  $b_i = l_i \forall i$ , суммарный эффект программы составляет (при  $R = 1$ ):

$$L(S^*) = \frac{n-1}{Q_3} = 10/3,$$

а общее финансирование  $S^* = 25/9$ , что в  $25/9$  раза больше бюджетных средств. Равновесные заявки фирм составят:

$$S_1^* = 20/9, \quad S_2^* = 14/9.$$

В выше рассмотренном примере мы положили  $l_i = b_i, i = \overline{1, n}$ . Определим теперь приоритеты  $\{l_i\}$ , максимизирующие суммарный эффект, то есть определим  $\{l_i > 0\}$  такие, что выражение

$$\sum_{i=1}^n l_i S_i^* = \sum_{i=1}^n \frac{b_i(n-1)R}{l_i Q} \left[ 1 - \frac{(n-1)q_i}{Q} \right] \quad (2.6.5)$$

принимает максимальное значение, и после замены  $q_i/Q = \alpha_i, l_i = (1 - a_i)/q_i$ ,

$p_i = (1 - a_i)/b_i$  оно приводится к виду

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{l_i(n-1)\alpha_i}{p_i} [1 - (n-1)\alpha_i]. \quad (2.6.6)$$

Определим теперь  $\{\alpha_i \geq 0\}$ ,  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ , которые максимизируют (2.6.6). Применение метода множителей Лагранжа дает:

$$l_i^0 = \frac{1+(n-2)\beta_i}{2(n-1)}, \quad \beta_i = \frac{p_i}{\sum_j p_j}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.6.7)$$

Соответственно

$$l_i^0 = \frac{1-\alpha_i}{\alpha_i^0}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Отметим, что при двух фирмах оптимальные приоритеты от коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$  не зависят.

Пример 2. Найдем оптимальные приоритеты для примера 1. При двух фирмах имеем:

$$\alpha_1^0 = \alpha_2^0 = 1/2.$$

Подставляя в (2.6.6), получаем

$$p_1 = 0, 1; p_2 = 0, 2; \beta_1 = 1/3; \beta_2 = 2/3;$$

$$\Phi = \left[ \frac{\alpha_1^0}{p_1} (1 - \alpha_1^0) + \frac{\alpha_2^0}{p_2} (1 - \alpha_2^0) \right] = 15/4 > 10/3.$$

При этом и суммарное финансирование увеличилось до 25/8.

Оптимальные приоритеты могут изменить количество фирм-претендентов для участия в программе. Проверим вариант с тремя фирмами. Получаем:

$$p_1 = 0, 1; p_2 = 0, 2; p_3 = 0, 3; \beta_1 = 1/6; \beta_2 = 1/3; \beta_3 = 1/2;$$

$$\alpha_1^0 = \frac{1+\beta_1}{4} = \frac{7}{24}; \quad \alpha_2^0 = \frac{1+\beta_2}{4} = \frac{1}{3}; \quad \alpha_3^0 = \frac{1+\beta_3}{4} = \frac{3}{8}.$$

Так как все  $\{\alpha_i^0\}$  меньше 1/2, условия (2.6.4) выполняются. Подставляем в (2.6.6), получаем:

$$\Phi = 2 \left[ \frac{\alpha_1^0}{p_1} (1 - 2\alpha_1^0) + \frac{\alpha_2^0}{p_2} (1 - 2\alpha_2^0) + \frac{\alpha_3^0}{p_3} (1 - 2\alpha_3^0) \right] = 25/6.$$

Видим, что эффективность механизма увеличилась. Теперь рассмотрим вариант четырех фирм:

$$p_1 = \beta_1 = 0, 1; p_2 = \beta_2 = 0, 2; p_3 = \beta_3 = 0, 3; p_4 = \beta_4 = 0, 4;$$

$$\alpha_1^0 = \frac{1+2\beta_1}{6} = 0, 2; \quad \alpha_2^0 = \frac{1+2\beta_2}{6} = \frac{7}{30}; \quad \alpha_3^0 = \frac{4}{15}; \quad \alpha_4^0 = 0, 3.$$

Условия (2.6.4) опять же выполняются. Суммарный эффект составит:

$$\frac{\Phi}{K} = 3 \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i^0}{p_i} (1 - 3\alpha_i^0) = 3 \left[ \frac{0, 2 \cdot 0, 4}{0, 1} + \frac{7 \cdot 0, 3 \cdot 0, 5}{30} + \frac{8}{45} + 0, 1 \cdot 0, 3 \cdot 2, 5 \right] = 4 \frac{5}{24} > \frac{25}{6}$$

Так как эффект опять увеличился, проверяем случай  $n = 5$ :

$$p_1 = 0, 1; p_2 = 0, 2; p_3 = 0, 3; p_4 = 0, 4; p_5 = 0, 5;$$

$$\beta_1 = 1/15; \beta_2 = 2/15; \beta_3 = 1/5; \beta_4 = 4/15; \beta_5 = 1/3;$$

$$\alpha_1^0 = \frac{1+3\beta_1}{8} = \frac{6}{40}; \quad \alpha_2^0 = \frac{7}{40}; \quad \alpha_3^0 = \frac{8}{40}; \quad \alpha_4^0 = \frac{9}{40}; \quad \alpha_5^0 = \frac{10}{40}.$$

Условие (2.6.4) при пяти фирмах не выполняется. Поэтому оптимальное решение включает четыре фирмы-претендента, имеющие суммарный эффект  $4 \frac{5}{24}$ . Выбор оптимального механизма смешанного финансирования

позволил увеличить эффект почти на 25%, не изменяя объем бюджетного финансирования.

Пусть теперь эффект от реализации проектов определяется по нелинейной формуле:

$$\phi_i(S_i) - y_i = \frac{1}{\alpha} S_i^\alpha r_i^{1-\alpha}, \quad 0 < \alpha < 1. \quad (2.6.8)$$

Интересы фирмы в этом случае описываются выражением:

$$\phi_i(S_i) - y_i = \frac{1}{\alpha} S_i^\alpha r_i^{1-\alpha} - (S_i - x_i). \quad (2.6.9)$$

Рассмотрим механизм прямых приоритетов  $\eta_i(S) = \frac{S_i}{\sum_j S_j}$ .

Допустим, что верна гипотеза слабого влияния, то есть, каждая фирма не учитывает влияния собственной заявки на общий делитель ( $\sum_j S_j$ ). Тогда равновесная заявка  $i$ -й фирмы определяется из уравнения

$$\left(\frac{r_i}{S_i}\right)^{1-\alpha} = 1 - \frac{1}{S} \quad (2.6.10)$$

или

$$S_i = r_i \left(1 - \frac{1}{S}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}, \quad (2.6.11)$$

где  $S$  находится из условия

$$H = \sum_j r_j, H = S \left(1 - \frac{1}{S}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}. \quad (2.6.12)$$

Уравнение (2.6.12) имеет единственное решение  $S^* > 1$ , причем  $S^* > H$ , что в случае  $H > 1$  следует из неравенства:

$$\left(1 - \frac{1}{H}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} < 1.$$

Непосредственное финансирование позволяет получить фирме  $i$  максимум прибыли, если финансирование  $S_i = r_i$ . Тогда сумма привлеченных средств частных фирм равна  $H$ . При механизме смешанного финансирования обеспечивается привлечение финансов частных фирм, превышающее  $H$ .

Рассмотренный оптимальный механизм в некоторой степени аналогичен конкурсному механизму, при котором сначала средства получает фирма, предложившая максимальную заявку. Здесь мы не учитывали важное практическое ограничение, при котором фирма получает не более заявленного объема финансирования. Разработка механизма распределения затрат с учетом этого условия является более сложной задачей, требующей дополнительных исследований.

#### *Механизмы самокупаемости*

Перед руководством проекта стоит много задач, основной из которых является задача минимизации затрат на его реализацию. Сложные проекты состоят, как правило, из множества подпроектов или операций. Определение оптимальной последовательности операций (где оптимальность понимается как достижение экстремума определенной целевой функции, спе-

цифичной для конкретного проекта и условий его реализации) производится в теории сетевого планирования и управления.

Разберем понятие операционных и общих затрат. Пусть имеются  $n$  операций и даны их стоимости  $\{c_i\}_{i=1}^n$ , тогда общие затраты на проект составят  $C = \sum_{i=1}^n c_i$ . Заметим, что порядок выполнения операций не влияет на величину  $C$ . О каком управлении тогда может идти речь?

Если МП имеет на реализацию проекта сумму  $R_0$  и  $R_0 \geq C$ , то имеющихся средств хватает на выполнение операций в любой последовательности. Но, как правило,  $R_0 < C$ . Какие меры принять в этом случае?

Допустим, что  $i$ -я операция описывается тройкой  $(C_i, D_i, \tau_i)$ , где  $D_i \geq 0$  – прибыль от  $i$ -ой операции,  $\tau_i$  – продолжительность. Пусть имеются прибыльные операции ( $D_i \geq C_i$ ) и убыточные ( $D_i < C_i$ ). Некоторые операции при нехватке исходных средств могут выполняться тогда за счет прибыли от выполненных операций. Использующие этот эффект механизмы управления финансами называются механизмами самофинансирования или механизмами самокупаемости. Идеальным случаем является автономный проект, где самофинансирование позволяет полностью его выполнить, без использования внешних источников.

Рассмотрим простой случай, когда последовательность выполнения операций произвольная, причем операции могут вестись параллельно.

Пусть  $t_i \geq 0$  – время начала операции  $i$ ,  $R$  – величина заемных средств. МП может получить беспроцентный кредит в произвольный момент времени и любом объеме.

Объем финансовых средств в момент времени  $t$  равен:

$$F(t) = R_0 + R - \sum_{i=1}^n C_i I(t \geq t_i) + \sum_{i=1}^n D_i I(t \geq T_i + \tau_i) \quad (2.6.13)$$

где  $I(t \geq t_i) = \begin{cases} 1, & t \geq t_i \\ 0, & t < t_i \end{cases}$  – функция-индикатор.

Возможность выполнения всех операций должна обеспечиваться неотрицательным финансовым балансом (2.6.13) в любой момент времени, то есть должно выполняться  $F(t) \geq 0 \quad \forall t \in [0, T]$ , где  $T$  – время выполнения проекта.

Описанная модель инициирует решение целого ряда оптимизационных задач:

1. Задача выбора последовательности реализации операций, которая минимизирует суммарную величину заимствованных средств:

$$\begin{cases} R \rightarrow \min_{\{t_i\}} \\ F(t) \geq 0, \quad \forall t \geq 0. \end{cases} \quad (2.6.14)$$

2. Задача минимизации времени реализации проекта  $T = \max_i \{t_i + \tau_i\}$  с фиксированным значением привлекаемых средств или за счет собственных средств:

$$\begin{cases} T \rightarrow \min_{\{t_i\}} \\ R = \text{const}, F(t) \geq 0, \forall t \geq 0. \end{cases} \quad (2.6.15)$$

Кроме того, возможны и другие постановки. Все оптимизационные задачи заключаются в поиске оптимальной последовательности выполнения операций, обеспечивающей оптимальный механизм самофинансирования. Введя дисконтирование по аналогии с (2.6.15) можно максимизировать дисконтированную прибыль и т.п. Технологические ограничения (при наличии) должны быть добавлены к ограничениям задач (2.6.14) – (2.6.15).

На сегодняшний день нет эффективных и универсальных методов решения задач рассматриваемого класса. Задачи сетевого планирования используют при решении методы целенаправленного перебора, методы ветвей и границ (см. часть 1 и 3). В качестве примера рассмотрим следующий эвристический алгоритм для решения задачи (2.6.15).

1. Находим все комбинации операций, допустимые по бюджетному ограничению и которые можно начать в нулевой момент времени.

2. В каждом допустимом варианте определяем невыполненные операции, которые могут быть начаты при окончании некоторых выполняемых операций.

Шаги 1 и 2 дают все допустимые варианты (получаем дерево вариантов). При этом могут оказаться висячие вершины, которым соответствует невыполнение всех операций. Выбираем только те варианты, в которых выполняются все операции проекта, из них определяем решение задачи (2.6.15) – вариант минимальной продолжительности.

Описанный выше алгоритм эффективней простого перебора – при переборе вариантов сразу отсеивались неудовлетворительные и не рассматривались деревья, которые имели их в качестве корневых вариантов.

Аналитические методы решения подобных оптимизационных задач существуют для очень узкого класса задач сетевого планирования [1, 6]. Так может быть решена задача (2.6.14).

Оптимальное решение данной задачи заключается в следующей последовательности: сначала выполняются прибыльные операции по возрастанию затрат (более дешевые), затем выполняются убыточные операции по убыванию дохода.

В этом случае придется занимать на затраты для первой операции и для остальных операций компенсировать нехватку собственных средств на их реализацию. Таким образом, найденное решение минимизирует величину привлеченных средств.

Выше решалась задача сетевого планирования в случае, когда имеется полная информация об операциях, т.е. достоверно известны  $(C_i, D_i, \tau_i)_{i=1}^n$ . Допустим теперь, что истинные затраты, необходимых на выполнение операций, неизвестны. Пусть  $S_i$  – оценка затрат, сообщаемая исполнителем  $i$  о своей операции,  $i = \overline{1, n}$ . МП известны значения  $\{D_i\}$ . Исполнителей,

имеющих  $D_i \geq S_i$ , т.е. приоритетных, упорядочиваем по возрастанию затрат:  $S_1 \leq S_2 \leq \dots \leq S_k$ , а исполнителей, выполняющих убыточные операции, упорядочиваем по убыванию  $D_i$ :  $D_{k+1} \geq D_{k+2} \geq \dots \geq D_n$ , при этом все исполнители в заявленном объеме получают финансирование.

Допустим, что все исполнители заинтересованы получать финансирование в ранние сроки, при неубывании собственного дохода. Каждый исполнитель при этом стремится к максимизации своего дохода. Исполнители, у которых  $D_i < C_i$ , стремятся увеличивать  $S_i$ , потому как, сообщая  $S_i < D_i$  и, тем самым, попадая в приоритетные исполнители, они уменьшают свой доход ( $S_i + D_i - C_i$ ) (доход в этом случае равен  $D_i$ ). Упорядочение убыточных исполнителей сохраняется, и они сообщают максимально возможные заявки  $S^{\max}$ . Приоритетные исполнители сообщают тогда заявки в следующих размерах:

$$S_i^* = \min(D_i, S_{i+1}^*), \text{ для } i = 1, k-1; \quad S_k^* = D_k \quad (2.6.16)$$

Для данного механизма имеется эквивалентный прямой механизм такой же эффективности: МП предлагает сообщить исполнителям  $\{C_i\}$  и, используя эту информацию, убыточным исполнителям определяет  $S_i^* = S^{\max}$ , а приоритетным – в соответствии с (2.6.16).

Сообщение достоверной информации в соответствующем прямом механизме является равновесной стратегией исполнителей.

#### *Противозатратные механизмы*

Рассмотрим финансовые механизмы, с помощью которых МП может добиться эффективного управления в случае исполнителей-монополистов, участвующих в проекте.

При большом числе однородных исполнителей, в результате конкуренции между ними, каждому отдельному исполнителю невыгодно завышать цену и себестоимость продукции. При наличии монополистов необходимо разработать специальные механизмы управления, которые обеспечивали бы невыгодность завышения затрат. Механизмы управления, побуждающие исполнителей-монополистов в условиях отсутствия конкуренции максимально повышать эффективность деятельности, обеспечивать высокое качество и минимальные затраты при выполнении соответствующих работ, называются противозатратными.

Использование противозатратных механизмов основано на следующей общей идее. Пусть целевая функция исполнителей зависит от двух типов переменных:

1. Параметры, определяемые самим исполнителем (объемы выпуска, затраты труда и т.д.).
2. Параметры, устанавливаемые МП (коэффициенты ценообразования, норматив рентабельности и т.д.).



Задача МП заключается в определении параметров второго типа, обеспечивающих достижение экстремума целевой функции исполнителя по некоторым параметрам первого типа.

В качестве примера рассмотрим задачу формирования противозатратного механизма ценообразования. Пусть себестоимость продукции исполнителя равна

$$C = S + a, \quad (2.6.17)$$

где  $a$  – трудозатраты;

$S$  – материальные затраты, включающие амортизацию оборудования, затраты на материалы и т.д.

Пусть цена продукции определяется по формуле:

$$Z = (1 + p)C, \quad (2.6.18)$$

где  $p$  – заданный норматив рентабельности.

Тогда прибыль исполнителя:

$$\Pi = (Z - C)O = pCO, \quad (2.6.19)$$

где  $O$  – объем производства.

Если бы МП имел возможность точно определять общественно необходимые затраты (ОНЗ) на производство каждой единицы продукции, то ценообразование было бы решаемой задачей. Но ОНЗ известны только исполнителю, который, будучи активным, может сообщить себестоимость большую, чем ОНЗ, в силу своей заинтересованности в этом при постоянном нормативе рентабельности  $p$ . Поэтому в рассматриваемом примере механизм не является противозатратным. Чтобы достичь противозатратности, необходимо норматив рентабельности связать с эффективностью деятельности исполнителя.

Эффективность исполнителя определим следующим образом:

$$\mathcal{E} = l/C, \quad (2.6.20)$$

где  $C$  – себестоимость производства, определяемая исполнителем;

$l$  – эффект, устанавливаемый потребителем или МП.

Эффективность растет с ростом  $l$  и убывает с ростом  $C$ .

Определим теперь зависимость  $p = p(\mathcal{E})$ , чтобы предложенный механизм имел свойство противозатратности. Необходимо для этого, чтобы прибыль исполнителя с ростом затрат убывала, то есть:

$$\frac{d\Pi}{dC} \leq 0. \quad (2.6.21)$$

Кроме того, цена продукции должна расти при росте себестоимости, то есть:

$$\frac{dZ}{dC} \geq 0. \quad (2.6.22)$$

Условия (2.6.21)–(2.6.22) являются условиями противозатратности. Преобразовав их, получаем следующие ограничения:

$$0 < \mathcal{E} \frac{dp(\mathcal{E})}{d\mathcal{E}} - p(\mathcal{E}) < 1. \quad (2.6.23)$$

Добавляя ограничение  $p(1) = 0$  (эффект равен затратам, продукт не приносит прибыли), получаем выражение для зависимости, которая обеспечивает противозатратность механизма ценообразования [2]:

$$p(\varepsilon) = \varepsilon \int_1^{\varepsilon} \frac{h(x)}{x^2} dx, \quad (2.6.24)$$

где  $h(x)$  – некоторая функция,  $h(x) \in (0, 1)$ . Близость  $h(x)$  к нулю показывает сильное влияние уменьшения затрат на снижение цены и слабое влияние уменьшения затрат при росте прибыли. Близость  $h(x)$  к единице, наоборот, показывает слабое влияние уменьшения затрат на снижение цены и сильное влияние уменьшения затрат при росте прибыли исполнителя. Поэтому МП в каждом конкретном случае должен подбирать необходимую зависимость.

Выше полученные выводы справедливы для показателей прибыли, цены, фонда материального поощрения и т.п. Затратные тенденции сохраняются при формировании фактических доходов по приведенным нормативам. Чтобы исключить эти тенденции необходимо обеспечить ввод отдельного норматива отчислений от сверхплановой прибыли в фонд материального поощрения.

Подбор нормативов может также обеспечить устранение номенклатурного сдвига (не меняя себестоимости, но при различных соотношениях общественных и трудовых затрат) [2].

При фонде оплаты труда, складывающемся из фонда материального поощрения  $\alpha\Pi$  и фонда заработной платы  $\beta\Pi$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  – некоторые коэффициенты, и при постоянном коэффициенте  $p$  противозатратность достигается установлением переменного коэффициента  $\alpha = \alpha(l/C)$  [2, 5].

Если прибыль образуется от трудовых затрат, в отличие от (2.6.17) – (2.6.19),  $Z = (1 + p(\varepsilon))\beta + S$ ,  $\Pi = p(\varepsilon)\beta$ , то строение противозатратного механизма происходит аналогичным образом.

В других случаях экономия материальных и трудовых ресурсов, получаемая при снижении затрат, может использоваться для дальнейшего увеличения объема выпуска продукции, получая дополнительную прибыль. Условия противозатратности для подобной ситуации проведены в [2].

Противозатратность по оплате труда, связанная с возрастанием фонда оплаты труда при уменьшении затрат, является весьма сильным условием. Действительно, противозатратный эффект предполагает, что уменьшение затрат увеличивает не весь фонд оплаты, а оплату труда работников, обеспечивших это снижение. Оказалось возможным создание сильно противозатратного механизма управления, при котором эффективно трудящиеся сотрудники нетерпимы к присутствию бездельников и лентяев [2].

Рассмотренные выше механизмы конкурсного распределения ресурсов обладают тем свойством, что конкурсность весьма существенно усиливает противозатратные качества механизма. Противопоставление противозатратных механизмов, конкурсным механизмам, например, при формирова-

нии договорных цен, является ошибочной точкой зрения. Действительно, конкурентные механизмы эффективны при «претендентах равной силы» и оказываются не очень эффективными при монополистах. Таким образом, противозатратные и конкурсные механизмы не исключают друг друга, а, скорее, взаимодополняют. Противозатратные механизмы выполняют антимонопольную роль, они «включаются» при наличии монополиста и «отключаются» при наличии равных претендентов, когда эффективную работу обеспечивают конкурсные механизмы. Проиллюстрируем это утверждение следующим примером.

Пусть МП организует конкурс на выполнение проекта с полезным эффектом  $L$  между  $m$  исполнителями. Пусть  $C_i$  – себестоимость работ исполнителя  $i$ . Допустим, что исполнители стремятся к максимизации прибыли и известна формула формирования цены, которая противозатратна по прибыли:

$$Z_i = (1 + p(\Theta_i))C_i, \Theta_i = L/C_i, i = 1, \dots, m. \quad (2.6.25)$$

Обозначим  $y_i$  – гарантированный норматив рентабельности исполнителя  $i$ . Очевидно, исполнителю выгодно выполнять работу, если цена ее будет не меньше  $A_i = (1 + y_i) C_i$ . Если  $p_i(\Theta_i) > y_i, \forall i = \overline{1, m}$ , то заключение договора с МП выгодно всем исполнителям. При наличии хотя бы одного исполнителя-монополиста (например, с  $i$ -м номером), договор был бы заключен по цене  $Z_i$ . При нескольких исполнителях начинается соревнование. Упорядочим исполнителей по возрастанию  $A_i$ :

$$A_1 \leq A_2 \leq \dots \leq A_m.$$

Очевидно, что победителем такого конкурса становится первая организация с минимальной ценой  $\{A_i\}$ , при этом цена определяется выражением:

$$Z^* = \min(Z_1, A_2). \quad (2.6.26)$$

Действительно, при  $Z_1 \leq A_2$  договор по цене  $Z^*$  невыгоден остальным исполнителям (первая организация становится монополистом и вступает в силу противозатратная часть механизма). При организации конкурса на реализацию нескольких проектов, равновесные договорные цены победителей определяются аналогично (2.6.26).

## Глава 2.7. Стимулирование исполнителей проекта

### *Контрактные механизмы стимулирования*

В настоящее время наиболее распространенной в России и за рубежом является контрактная форма взаимодействия между работником и работодателем (руководителем фирмы, заказчиком и т.п.). Теория контрактов составляет специальный раздел теории управления социально-экономическими системами. Различаются трудовые, страховые, деловые и прочие контракты. Взаимоотношения наемного рабочего и предпринима-

теля, покупателя и продавца, врача или юриста и его клиентов, страховой компании или банка со своими клиентами регулируются в виде контрактов.

В общем случае контракт содержит взаимные обязательства, согласованные между сторонами. Ниже будем рассматривать трудовые контракты (более подробно контрактные механизмы изложены в работе [5]). В терминологии управления проектами в контракте участвуют две стороны – исполнители и менеджеры проекта. В трудовом контракте содержатся следующие условия:

1. Исполнителю поручается некоторая работа, и он обязуется ее выполнить.

2. Менеджер проекта обязуется по результатам работы выплатить некоторое вознаграждение (кроме того содержатся условия труда, требования к результатам, сроки и т.п.).

3. Оговаривается в трудовом контракте более конкретно зависимость выплат исполнителю от результатов его работы. Эта зависимость является функцией стимулирования (системой стимулирования, механизмом стимулирования). Изменяя суммы выплат, менеджер проекта может побудить исполнителя к совершению тех или иных действий и добиться необходимых результатов, таким образом влиять на интересы исполнителя. Но возможности управления ограничены при ограниченном фонде заработной платы. Как менеджеру проекта согласовать интересы исполнителя со своими интересами, какую систему стимулирования следует ему использовать? Ниже мы рассмотрим задачи стимулирования, дающие ответ на поставленные вопросы. Рассмотрим формальную модель задачи стимулирования.

Пусть проект состоит из одного менеджера проекта и одного исполнителя, который выбирает воздействие  $x \geq 0$ . Воздействием может являться объем выпускаемой продукции, количество отработанных часов и т.п. Для воздействия  $x$  необходимы затраты  $C(x)$ , которые могут включать затраты труда самого исполнителя, амортизацию оборудования, стоимость сырья и т.п. На функцию затрат  $C(x)$ , как правило, накладываются следующие очевидные условия:  $C(0) = 0$ , (затраты при отсутствии воздействия равны нулю),  $C(x)$  – возрастающая функция (чем больше, к примеру, объем производства, тем больше затраты).

По результатам деятельности исполнителя менеджер проекта получает доход  $H(x)$ , ( $H(0) = 0$  и  $H(x)$  – возрастающая функция) и выплачивает исполнителю зарплату  $\sigma(x)$ . Зависимость  $\sigma(\cdot)$  является функцией стимулирования. Будем считать, что определение функции стимулирования определяет однозначно контракт между менеджером проекта и исполнителем.

Опишем теперь целевые функции. Целевая функция менеджера проекта

$$\Phi(x) = H(x) - \sigma(x) \tag{2.7.1}$$

есть разность дохода менеджера проекта и зарплаты исполнителю.

У исполнителя целевая функция

$$f(y) = \sigma(y) - C(y) \quad (2.7.2)$$

является разностью его зарплаты и затрат.

Функция стимулирования должна удовлетворять следующим ограничениям:

1. Она положительная (отрицательное стимулирование рассматривается как штрафы);

2. Она должна быть ограниченной сверху, в силу ограниченности  $C$  – фонда заработной платы. Таким образом, допустимые функции стимулирования должны удовлетворять условию  $0 \leq \sigma(x) \leq C$ .

Цели участников системы заключаются в максимизации своих целевых функций – (2.7.1) для менеджера проекта, (2.7.2) – для исполнителя. Введем дополнительное ограничение – менеджер проекта должен обеспечить значение целевой функции исполнителя, не меньшее, чем некоторое  $U \geq 0$ , которое интерпретируется как доход, получаемый работником, не принимающим участия в данном контракте. Это может быть, например, доход от другого контракта или пособие по безработице.

Порядок функционирования механизма следующий:

– менеджер проекта сообщает исполнителю функцию стимулирования  $\sigma(\cdot)$ ;

– исполнитель, зная эту функцию, выбирает действие, способствующее максимизации (2.7.2);

– находятся значения целевых функций всех участников, определяются выплаты и т.д.

Математическая модель простейшей задачи стимулирования имеет следующий вид:

$$\begin{cases} H(x^*) - \sigma(x^*) \rightarrow \max_{0 \leq \sigma(x) \leq C}, & (2.7.3) \\ \sigma(x^*) - C(x^*) \geq \sigma(x) - C(x), \quad \forall x \geq 0, & (2.7.4) \\ \sigma(x^*) - C(x^*) \geq U, & (2.7.5) \end{cases}$$

В общем случае, решая более сложные задачи, менеджер проекта сталкивается с большими трудностями. Задачу (2.7.3)–(2.7.5) удастся решить, не применяя сложные вычислительные процедуры.

Если менеджер проекта стимулирование не использует ( $\sigma \equiv 0$ ), то, согласно (2.7.4), исполнитель выберет воздействие  $x = 0$ , которое минимизирует затраты, т.е. предпочтет не работать.

Можно показать, что МП может побудить исполнителя выбрать максимальное действие, равное  $x_{\max}$ :

$$C(x_{\max}) = C - U. \quad (2.7.6)$$

МП может также побудить исполнителя выбрать некоторое действие  $\tilde{x}$ , меньшее  $x_{\max}$ , используя, к примеру, систему стимулирования:

$$\begin{cases} C(x) + U, & x = \tilde{x} \\ 0, & x \neq \tilde{x} \end{cases}, \quad 0 \leq \tilde{x} \leq x_{\max}. \quad (2.7.7)$$

Система стимулирования (2.7.7) является оптимальной [4, 6]. Рассмотрим теперь, каковы возможности МП управлять исполнителем. Подставив (2.7.7) в (2.7.3), получаем:

$$\Phi(\tilde{x}) = H(\tilde{x}) - C(\tilde{x}) - U, \quad 0 \leq \tilde{x} \leq x_{\max}. \quad (2.7.8)$$

Так как  $H(0) = 0$ , когда стимулирование не используется, то МП должен применять систему стимулирования (2.7.7), выбирая  $\tilde{x}$ , которое максимизирует (2.7.8).

Рассмотрим пример, который иллюстрирует рассмотренный выше алгоритм решения задачи стимулирования.

Положим  $C(x) = x^2$ ,  $H(x) = x$ ,  $C = 4$ ,  $U = 0$ . Из условия (2.7.6) определим  $x_{\max} = 2$ . Из (2.7.7) следует, что

$$\sigma(x) = \begin{cases} x^2, & x = \tilde{x} \\ 0, & x \neq \tilde{x} \end{cases}, \quad 0 \leq \tilde{x} \leq 2. \quad (2.7.9)$$

Тогда, в соответствии с (2.7.8)

$$\Phi(\tilde{x}) = \tilde{x} - \tilde{x}^2. \quad (2.7.10)$$

Целевая функция МП (2.7.10) достигает максимума при  $\tilde{x} = x^* = 1/2 \in [0, 2]$ . Следовательно, оптимальная функция стимулирования для нашего примера имеет вид:

$$\sigma^*(x) = \begin{cases} \frac{1}{4}, & x = \frac{1}{2}; \\ 0, & x \neq \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (2.7.11)$$

Качественный анализ приведенного выше алгоритма решения задачи стимулирования, позволяющего получить наилучший для менеджера проекта контракт, показывает, что правило «чем больше заплатишь, тем больше добьешься», работает не всегда. Лучше, пользуясь интуицией, решить задачу формально, затем проанализировать решение.

Была рассмотрена задача стимулирования в статической одноэлементной системе, и получено ее аналитическое решение. Аналитическое решение в динамических многоэлементных системах удастся найти не всегда (численные методы решения задач стимулирования приведены в [6]). Ниже рассмотрим ряд подобных моделей.

#### *Стимулирование в многоэлементных системах*

Если в проекте участвуют МП и  $n$  исполнителей, и они независимы, то МП может стимулировать их независимо друг от друга. Тогда задача стимулирования распадается на ряд одноэлементных задач, методы для решения которых приведены выше. При взаимозависимых исполнителях задача существенно усложняется. Некоторые возможные случаи рассмотрим ниже.

Пусть имеется организационная система, где исполнители не связаны технологически и ресурсно, а имеются ограничения только по общему суммарному фонду заработной платы (ФЗП).

Целевая функция МП в этом случае имеет следующий вид:

$$\Phi(x_1, \dots, x_n) = H(x_1, \dots, x_n) - \sum_{i=1}^n \sigma_i(x_i), \quad (2.7.12)$$

где  $H(x_1, \dots, x_n)$  – доход МП от результатов деятельности исполнителей  $x = (x_1, \dots, x_n)$ ,  $\sigma_i(x)$  – функция стимулирования  $i$ -го исполнителя, а  $\sum_{i=1}^n \sigma_i(x_i)$  – сумма затрат на стимулирование. Пусть стимулирование исполнителя  $i$  ограничено  $0 \leq \sigma_i \leq C_i$ , где  $C_i$  – константы,  $\sum_{i=1}^n C_i \leq C$ ,  $C$  – общий ФЗП.

У исполнителей целевые функции имеют вид:

$$f_i(x_i) = \sigma_i(x_i) - C_i(x_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2.7.13)$$

где  $C_i(x_i)$  – затраты исполнителя  $i$ . Задача заключается в нахождении функций стимулирования  $\{\sigma_i(x_i)\}_{i=1}^n$  (контрактов), которые максимизируют целевую функцию МП (2.7.12), при условии, что выбираемые исполнителями действия, максимизируют их целевые функции. Таким образом, МП решает следующую задачу:

$$\begin{cases} H(x_1^*, \dots, x_n^*) - \sum_{i=1}^n \sigma_i(x_i^*), \rightarrow \max_{\sigma_i}, & (2.7.14) \\ \sigma_i(x_i^*) - C_i(x_i^*) \geq \sigma_i(x_i) - C_i(x_i), \quad \forall x_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n} & (2.7.15) \\ \sigma_i(x_i^*) - C_i(x_i^*) \geq U_i, \quad i = \overline{1, n} & (2.7.16) \end{cases}$$

Смысл ограничений (2.7.16) такой же, как и ограничения (2.7.5) в одноэлементной задаче. Следовательно, в многоэлементной системе контракт имеет вид  $\sigma = (\sigma_1(\cdot), \dots, \sigma_n(\cdot))$ .

Решение задачи стимулирования (2.7.14)–(2.7.16) основывается на следующей основной идее. При фиксированных ограничениях  $C_i$  механизма стимулирования МП определяет множество действий исполнителей, наиболее им полезных. Используя эти параметрические зависимости, МП сводит задачу стимулирования к известной задаче условной оптимизации – найти параметры  $\{C_i\}$ , которые максимизируют целевую функцию МП при ограниченном суммарном фонде заработной платы:

$$\sum_{i=1}^n C_i \leq C. \quad (2.7.17)$$

Если мы нашли зависимости  $x_i^{\max}(C_i)$  (см. (2.7.6)–(2.7.7)), и целевая функция МП монотонна, то задача (2.7.14)–(2.7.16) заменяется задачей максимизации:

$$H(x_1^{\max}(C_1), \dots, x_n^{\max}(C_n)) - \sum_{i=1}^n [C_i(x_i^{\max}(C_i)) + U_i] \quad (2.7.18)$$

выбором  $(C_1, \dots, C_n)$ , которые удовлетворяют условию (2.7.17).

*Стимулирование в активных динамических системах*

Выше мы рассмотрели задачу стимулирования в многоэлементной статической системе. Другим обобщением является задача стимулирования в динамической одноэлементной системе, то есть в проекте, функциони-

рующим в нескольких периодах времени. Следует признать, что исследование динамических многоэлементных систем является более сложной задачей и не входит в рамки настоящей работы.

Пусть проект, функционирующий в течение  $T$  периодов, имеет одного исполнителя. Результат деятельности исполнителя  $x_t \in A_t$  в период  $t$  ( $t = \overline{1, T}$ ) требует затрат  $C_t(x_t)$  и приносит МП доход  $H_t(x_t)$ . Выплаты МП исполнителю в периоде  $t$  равны  $\sigma_t(x_t)$ . Целевые функции МП и исполнителя имеют вид:

$$\Phi_t(x_t, \sigma_t) = H_t(x_t) - \sigma_t(x_t), \quad (2.7.19)$$

$$f_t(x_t, \sigma_t) = \sigma_t(x_t) - C_t(x_t). \quad (2.7.20)$$

МП и исполнитель стремятся к максимизации суммарной дисконтированной полезности:

$$\Phi(x, \sigma) = \sum_{i=1}^T \delta^i \Phi_i, \quad (2.7.21)$$

$$f(x, \sigma) = \sum_{i=1}^T \gamma^i \Phi_i, \quad (2.7.22)$$

где  $\gamma$  и  $\delta$  – коэффициенты дисконтирования МП и исполнителя ( $\gamma, \delta \in (0, 1]$ ),  $x = (x_1, \dots, x_T)$ ,  $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_T)$ . Можно представить целевую функцию МП в более общем виде, чем (2.7.21), а именно:

$$\Phi(x, \sigma) = H(x_1, \dots, x_T) - \sum_{i=1}^T \delta^i \sigma_i(x_i). \quad (2.7.23)$$

#### *Стимулирование при условиях неопределенности*

Выше мы рассмотрели простейшую детерминированную задачу стимулирования. В ней предполагалось, что и МП, и исполнители обладают полной информацией об окружающей среде и друг о друге. Такое предположение на практике является слишком сильным, а модель – несколько идеализированной. МП не может знать всех возможностей исполнителей, результаты деятельности исполнителей могут зависеть от множества случайных или неопределенных факторов. При построении адекватной системы управления проектом следует учитывать эти неопределенные и случайные факторы. Ниже мы рассмотрим несколько моделей систем с неопределенностью и проведем анализ задачи формирования оптимальной функции стимулирования в этом случае.

Неопределенность бывает следующих видов: внутренняя при недостаточной информированности участников системы друг о друге, и внешняя неопределенность при зависимости параметров проекта от факторов внешней среды – от «состояния природы». Все такие модели систем с неопределенностью используют следующий метод: участники системы, используя имеющуюся у них информацию, снижают неопределенность, сводя при этом задачу к детерминированной, и в этих условиях принимают решение.

Используемый менеджерами проекта и исполнителями метод устранения неопределенности зависит от информации, которой они располагают о неизвестных параметрах. Различаются следующие способы устранения или снижения неопределенности:



1. Задача стимулирования при интервальной неопределенности. В этом случае участнику проекта известны диапазоны возможных значений неизвестных параметров, и он тогда может использовать способ максимального гарантированного результата (МГР). При использовании МГР участник предполагает наихудшее для себя значение неизвестного параметра, при этом стремится сделать такие действия, чтобы достичь максимума своей целевой функции в этой наихудшей ситуации. При расчете на наилучшее значение неизвестного параметра может быть использован более оптимистичный подход, чем МГР.

2. Задача стимулирования при вероятностных параметрах системы. Если участнику известны вероятностные характеристики неизвестного параметра (большая информация, чем только диапазон значений), то использование этой информации позволяет определить ожидаемые значения целевых функций. Устранение неопределенности при этом происходит усреднением значений целевых функций по известной их функции распределения.

3. Задача стимулирования с сообщением информации. При частичной информированности участников проекта, например, если исполнитель обладает большей, чем МП, информацией, МП может устранить неопределенность, запросив у исполнителя информацию о неизвестном параметре, затем использовать эту информацию для принятия управленческих решений. В этом случае, очевидно, появляется задача манипулирования.

4. Многоканальные механизмы стимулирования. При наличии нескольких одинаковых исполнителей, с одинаковыми условиями работы, МП может узнать информацию о неизвестных параметрах деятельности исполнителей, сравнивая результаты их деятельности. Для этого выбирается соответствующая структура системы управления.

Метод МГР подробно описан в [4, 5], в дальнейшем мы рассмотрим последние три метода устранения неопределенности.

#### *Задача стимулирования при вероятностных параметрах системы*

Рассматривая детерминированную задачу стимулирования, мы предполагали, что результат деятельности совпадает с действием исполнителя. Однако в жизни планируемый результат не всегда совпадает с действием. Анализируя вероятностную задачу стимулирования, мы предположим, что результат деятельности исполнителя  $z \in A_0$  отличается от его действия  $x \in A$ , являясь случайной величиной, которая зависит и от действия исполнителя, и от «состояния природы». К примеру, если результат деятельности исполнителя – количество производимой продукции, то это количество зависит как от действий самого исполнителя (количества отработанных часов, выбор технологии и т.п.), так и от случайных внешних факторов (соблюдения графика поставок материалов и оборудования, состояние рынка труда и т.д.).

Пусть и МП, и исполнитель знают плотность распределения вероятностей  $p(z, x)$  реализации результата  $z$ , при выбранном воздействии  $x$ . Обозначим  $F(z, x)$  – функцию распределения, соответствующую плотности  $p(z, x)$ . Например, может быть результат  $z = x + \theta$ , где  $\theta$  – случайная величина (состояние природы, аддитивная помеха). При равенстве нулю математического ожидания  $\theta$ , результат деятельности исполнителя совпадает в среднем с его действием. Если, однако,  $\theta > 0$ , то  $z > x$  – благоприятное состояние природы для исполнителя. Если  $\theta < 0$ , то планируемый результат меньше воздействия – неблагоприятное состояние внешней среды, что, к сожалению, довольно часто встречающееся в практике.

Функция распределения может принимать следующий вид:

$$F(z, x) = \begin{cases} F(z), & z < x \\ 1, & z \geq x \end{cases}. \quad (2.7.24)$$

Данная функция распределения используется в модели простого активного элемента [5].

Таким образом,  $x$  является верхней границей действия исполнителя. Действительно,  $F(z, x)$  – вероятность того, что  $z$  окажется меньшим  $x$ , то есть состояние природы может только уменьшить фактический результат исполнителя по сравнению с запланируемым.

Рассмотрим целевые функции данной задачи. Целевая функция МП может интерпретироваться, как его доход, который зависит от результатов деятельности исполнителя:

$$\Phi(z) = H(z). \quad (2.7.25)$$

Целевая функция исполнителя является разностью между его доходом и штрафами, которые зависят от его результата:

$$f(z) = h(z) - \chi(z), \quad (2.7.26)$$

где  $h(y)$  – доход исполнителя,  $\chi(z)$  – штрафы, выплачиваемые МП.

Информированность участников и алгоритм решения задачи следующий:

1. Менеджер проекта, зная функции (2.7.25), (2.7.26) и плотность распределения  $p(z, x)$ , выбирает функцию штрафов  $\chi(z)$  и информирует об этом исполнителя.

2. Исполнитель, зная  $\chi(z)$ , целевые функции (2.7.25), (2.7.26) и вероятностное распределение  $p(z, x)$ , выбирает действие  $x \geq 0$ .

3. Исполнителю становится известным «состояние природы»  $\theta$ , после чего определяется результат  $z = z(x, \theta)$ .

4. Менеджер проекта наблюдает результат  $z$  и собирает штрафы  $\chi(z)$ .

Необходимо отметить следующее:

1. Ни менеджер проекта, ни исполнитель не знают состояния природы на момент выбора своей функции штрафов и соответствующего действия.

2. Менеджер проекта наблюдает только результат  $z$ , он не знает действие исполнителя.

Такая информированность участников проекта распространена на практике. Менеджер проекта может не знать, какое действие планирует сделать исполнитель, он производит выплаты на основании результата его деятельности. Это незнание стратегии исполнителя является принципиальным отличием вероятностной задачи стимулирования от детерминированной. Из дальнейшего изложения будет видно, что при возможности менеджер проекта наблюдать действие исполнителя и производить за него выплаты, а не за результат, вероятностная задача тогда сводилась бы к детерминированной, и с ее решением не возникало бы проблем.

Так как менеджер проекта и исполнитель не знают состояния внешней среды при принятии решений, то они стремятся к максимизации ожидаемых значений своих целевых функций, используя распределение вероятностей (2.7.25) и (2.7.26), то есть:

$$\Phi(\chi, x) = \int_{A_0} H(z) p(z, x) dz = H(x), \quad (2.7.27)$$

$$f(\chi, x) = \int_{A_0} [h(z) - \chi(z)] p(z, x) dz, \quad (2.7.28)$$

соответственно.

Вероятностная задача стимулирования тогда имеет вид:

$$H(x^*) \rightarrow \max_{\chi(\cdot)}, \quad (2.7.29)$$

$$f(\chi, x^*) \geq f(\chi, x) \quad \forall x \in A. \quad (2.7.30)$$

При этом МП должен помнить, что исполнитель выбирает действие, максимизирующее его собственную целевую функцию (2.7.28) при известной системе стимулирования.

Обычно решить вероятностную задачу стимулирования гораздо сложнее, чем детерминированную. Общие методы ее решения описаны в [5], при этом не всегда удается аналитически найти оптимальное решение даже одноэлементной статической вероятностной задачи. К счастью, решить задачу (2.7.29)–(2.7.30) с функцией распределения (2.7.24) удастся достаточно легко [5]. При положительных функциях штрафов, ограниченных константой  $C$ , оптимальная система стимулирования имеет вид:

$$\chi(z) = \begin{cases} h(z) - h(z_{min}) + C, & z_{min} \leq z \leq z_{max}, \\ 0, & z \leq z_{min}, \quad z \geq z_{max} \end{cases}, \quad (2.7.31)$$

где  $z_{min}$ ,  $z_{max}$  таковы, что  $z_{min} \leq z_{max}$ ,  $h(z_{min}) = h_{max} - C = h(z_{max})$ , где  $h_{max}$  – максимум значения дохода исполнителя. Функция штрафов (2.7.31) называется компенсаторной, так как она компенсирует целевую функцию (2.7.26) – доход исполнителя.

При  $h(z) = z - (1/2r)z^2$ ,  $r > 0$ , получаем  $h_{max} = r/2$ ,  $z_{min} = r - \sqrt{2rC}$ ,  $z_{max} = r + \sqrt{2rC}$ .

Легко показать, что при росте ограничения  $C$  множество  $[y_{min}, y_{max}]$  увеличивается. А это не что иное, как действия, которые менеджер проекта побуждает исполнителя выбрать при использовании оптимальной системы стимулирования.

Так как все результаты по решению многоэлементных и динамических задач стимулирования могут использоваться при управлении системами в условиях неопределенности, то останавливаться на описании методов решения этих задач стимулирования в вероятностных системах не будем (достаточно полно специфика этих задач отражена в работе [5]).

*Децентрализованные механизмы стимулирования*

Сложные проекты имеют количество исполнителей и связей между ними настолько большое, что один менеджер проекта оказывается не в состоянии координировать и управлять деятельностью исполнителей. Необходимо в этом случае вводить дополнительные элементы управления – менеджеров подпроектов, таким образом, вводить промежуточный иерархический уровень в системе. Как правило, менеджеры подпроектов более компетентны, чем менеджер проекта, в тех задачах, которые решаются их подчиненными. Поэтому с их привлечением к участию в проекте может повыситься эффективность управления. Но увеличение управленческого персонала потребует дополнительных затрат, что может привести к понижению эффективности – система может перестать быть управляемой. Ниже рассмотрим ряд моделей, показывающих достоинства и недостатки децентрализованных механизмов стимулирования.

Полностью централизованная система управления проектом соответствует структуре, аналогичной приведенной на рис. 2.4.1, где в проекте  $n$  исполнителей и один МП.

Пусть целевая функция исполнителя  $i$  имеет вид

$$f_i(x_i) = \sigma_i(x_i) - C_i(x_i), \quad (2.7.32)$$

где  $0 \leq \sigma_i \leq C_i$ ,  $C_i(x_i) = \alpha_i x_i$ .

Если МП стремится к максимизации  $\sum_{i=1}^n x_i^2$ , то целевая функция будет иметь вид:

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i(x_i). \quad (2.7.33)$$

Если фонд стимулирования ограничен  $\sum_{i=1}^n \sigma_i(x_i) \leq C$  и параметры исполнителей полностью известны МП, то решение задачи стимулирования имеет вид:

$$C_i^* = C \frac{\alpha_i^2}{\sum_{j=1}^n \alpha_j^2}, \quad (2.7.34)$$

$$\sigma_i^*(x_i) = \begin{cases} C_i, & x_i = \frac{C_i^*}{\alpha_i} \\ 0, & x_i \neq \frac{C_i^*}{\alpha_i} \end{cases} \quad (2.7.35)$$

При этом значение целевой функции МП (эффективность механизма) равно:

$$\Phi^* = \frac{C^2}{\sum_{j=1}^n \alpha_j^2} - C. \quad (2.7.36)$$

Отметим, что при большом числе исполнителей МП приходится обрабатывать значительные объемы информации.

При наличии неопределенности, когда МП известно только, что параметры затрат  $\alpha_i$  исполнителя  $i$  лежат в пределах  $[\alpha_i^-, \alpha_i^+]$ , рассчитывая на наихудший случай, он вынужден в задаче (2.7.32) – (2.7.33) подставлять  $\alpha_i = \alpha_i^+$ . При этом МП вынужден фактически переплачивать исполнителям, эффективность механизма снижается:

$$\Phi_1^* = \frac{C^2}{\sum_{j=1}^n (\alpha_j^+)^2} - C. \quad (2.7.37)$$

Действительно,  $\Phi^*$  – убывающая функция по  $\alpha_i$ ,  $\alpha_i \leq \alpha_i^+$ , значит  $\Phi_1^* \leq \Phi^*$ .

Пусть теперь имеются МП и  $N$  менеджеров подпроектов ( $МП_1, МП_2, \dots, МП_N$ ), у каждого из которых в подчинении своя группа исполнителей. Структура такой децентрализованной системы приведена на рис. 2.4.1. Каждая подсистема  $k$  имеет  $МП_k$  и исполнителей  $u_1, \dots, u_{n_k}$ ,

$$\sum_{k=1}^N n_k = n.$$

Обозначим  $(\sigma^1, \dots, \sigma^N)$  – стимулирование ( $МП_1, МП_2, \dots, МП_N$ ) со стороны МП ( $\sigma^i \leq C^i, \sum_{i=1}^N C^i = C$ );  $(\sigma_1^k, \dots, \sigma_{n_k}^k)$  – стимулирование исполнителей группы  $k$  со стороны  $МП_k$

$$ПМ_k(\sigma_i \leq C_i, \sum_{i=1}^N C_i = C^i), k = \overline{1, N}.$$

Тогда целевая функция МП имеет вид:

$$\Phi(y, \sigma) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} y_i^2 - \sum_{k=1}^N \sigma^k, \quad (2.7.38)$$

целевая функция  $МП_k$ :

$$\Phi^k(y^k, \sigma^k) = \sigma^k(y^k) - \sum_{i=1}^{n_k} \sigma_i(y_i), \quad k = \overline{1, N}, \quad (2.7.39)$$

где  $x^k = (x_1, \dots, x_{n_k})$ , а целевая функция исполнителя  $i$  из группы  $k$ :

$$f_i(y_i, \sigma_i) = \sigma_i(y_i) - C_i(y_i), i = \overline{1, n_k}, k = \overline{1, N}. \quad (2.7.40)$$

Мы видим, что для исполнителей не изменился расчет целевой функции, по-прежнему она равна разности выплат, получаемых от его менеджера подпроекта, и своих затрат. Целевая функция  $МП_k$  равна разности выплат, получаемых от менеджера проекта, и сумме стимулирования исполнителей группы  $k$ . Тогда целевая функция менеджера проекта равна разности суммарного дохода от работы всех его исполнителей и стимулирования всех менеджеров подпроектов.

## Глава 2.8. Управление рисками проекта

Часто мы слышим высказывания: «этот проект рискованный» или «это – надежный проект» и т.п. Введем корректные определения этих утверждений в рамках рассматриваемых задач. Пусть заданы некоторые требования к проекту – сроки, качество, затраты и т.п., соблюдение которых образуют область допустимых результатов. Надежностью проекта будем считать его свойство сохранять основные параметры внутри допустимой области, несмотря на возможные воздействия неблагоприятного характера. Таким образом, надежный проект успешно выполняется даже в условиях влияния неопределенных и случайных факторов, оказывающих негативное влияние на результат проекта. К примеру, таким внешним фактором является нарушение (в допустимых пределах) графика поставок материалов и оборудования, что не должно срывать сроки выполнения проекта.

Можно под надежностью проекта понимать вероятность его успешного завершения. Мы будем в дальнейшем употреблять термин «надежность» в этом смысле. Вероятность выхода результатов проекта за пределы допустимой области называется риском (вероятность невыполнения проекта). Это понятие является двойственным к надежности.

Надежность проекта зависит от статистических или иных внешних факторов, а также от надежности исполнителей, причем последнее – это единственное, чем может управлять менеджер проекта. При этом различается управление трех типов:

1. Рассматривая возможности потенциальных исполнителей, МП выбирает тех, которые смогут обеспечить минимальный риск. Эту задачу управления надежностью менеджер проекта решает на стадии формирования команды исполнителей, и она будет рассмотрена в настоящей главе.

2. Менеджер проекта стремится обеспечить максимальную надежность проекта при фиксированном составе исполнителей. Покажем это утверждение на следующем примере. Пусть в проекте принимают участие  $n$  исполнителей с известными надежностями исполнителей  $q_i$ , которые зависят от выделенного каждому финансированию  $C_i$ :

$$q_i(C_i) = \frac{(1 - \varepsilon_i)}{R} C_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $0 < \varepsilon_i < 1$  – некоторые константы,  $R$  – общий объем финансирования, выделенный на обеспечение надежности. При  $C_i = 0$  надежность исполнителя  $q_i(C_i) = 0$ , при этом вероятность невыполнения задания (риск исполнителя) равна единице. При росте финансирования надежность исполнителя возрастает, а риск исполнителя уменьшается. Когда  $i$ -й исполнитель получает финансирование  $C_i \equiv R$ , риск его равен  $\varepsilon_i$ .

По известной надежности исполнителей определяется надежность проекта в целом. Проект считается невыполненным при невыполнении хотя

бы одним из исполнителей своего задания. Тогда в предположении независимости срывов в работе исполнителей, надежность проекта  $Q$  равна:

$$Q(q_1, \dots, q_n) = Q(C_1, \dots, C_n) = \prod_{i=1}^n \frac{(1 - \varepsilon_i)}{R} C_i.$$

Надежность  $Q(q_1, \dots, q_n)$  зависит от распределения финансирования вектора  $C = (C_1, \dots, C_n)$ . При ограничении фонда финансирования, то есть при:

$$\sum_{i=1}^n C_i \leq R,$$

МП может на ранней стадии выполнения проекта решать задачу максимизации его надежности – максимизировать надежность с помощью выбора вектора  $C = (C_1, \dots, C_n)$  при балансовом ограничении. Оптимальное распределение фонда финансирования в рассматриваемом примере оказывается следующее:

$$C_i = \frac{R}{\sum_{j=1}^n \frac{(1-\varepsilon_j)}{(1-\varepsilon_i)}}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Данный пример показывает, что при увеличении фонда финансирования и фиксированном составе исполнителей увеличивается и надежность. Но так как финансирование ограничено, то возможности такого управления также ограничены.

3. Оперативное управление надежностью предполагает принятие мер к исправлению ситуации, если при выполнении проекта обнаруживается возможность срывов (или уже они произошли), таким образом можно предотвратить срывы проекта в целом.

Если существуют ненулевые вероятности отказа элементов системы (исполнители не являются полностью надежными), то для повышения надежности можно ввести избыточность. Это значит, что если кто-то из исполнителей срывает свое задание, то для обеспечения выполнения проекта в срок должен существовать другой исполнитель, который мог бы заменить отказавший элемент. Этот исполнитель избыточен, для его участия в проекте МП в целях повышения надежности несет определенные затраты. Возникает задача определения оптимального соотношения между надежностью и затратами.

Выделяют два подхода к методам повышения надежности любой системы, основанных на использовании двух различных видов избыточности – функциональной и аппаратной. Аппаратная избыточность заключается во введении в состав исполнителей дублирующих друг друга исполнителей. Функциональная избыточность заключается во вводе в состав проекта исполнителей, которые могут выполнять функции исполнителей, допустивших срыв. На практике встречаются системы, обладающие свойствами аппаратной и функциональной избыточности. Ниже рассмотрим примеры,

иллюстрирующие использование избыточности для повышения надежности.

Пусть проект заключается в организации выпуска  $R = 5$  единиц какой-либо продукции. Потенциальных исполнителей, которые могут выпускать  $x = 1$  единиц продукции каждый, неограниченное число. Какое количество исполнителей следует привлечь МП для реализации данного проекта? При игнорировании надежности проекта очевидно, что следует взять 5 исполнителей, которые выпустят требуемый объем. Но, если каждый исполнитель может отказать (т.е. произвести 0 единиц продукции), и вероятность этого события  $p$ , а МП необходимо обеспечить объем выпуска продукции равный 5, то сколько исполнителей следует привлечь? Один исполнитель может произвести  $(1-p)$  объема выпуска. Из условия  $n(1-p) = 5$  определим  $n = 5/(1-p)$ . Видим, что увеличение вероятности отказа одного исполнителя ведет к увеличению числа исполнителей, которых следует привлекать.

МП может ориентироваться на вероятность выпуска определенного объема продукции. Например, решается следующая задача: сколько должно быть исполнителей  $n'$ , чтобы вероятность суммарного объема выпуска объема менее 5 не превышала заданной вероятности  $q$  (тогда надежность проекта будет  $Q = 1 - q$ ). Пусть вероятность отказа каждого исполнителя  $p = 0,15$ . При  $n' = 5$  риск невыполнения проекта равен  $1 - (1 - 0,15)^5 = 0,56$  – очень высокий риск. При введении аппаратной избыточности  $n' = 6$ ,  $q = 1 - C_6^5(1 - 0,15)^5 \cdot 0,15 - C_6^6(1 - 0,15)^6 \approx 0,22$ , при  $n' = 7$   $q \approx 0,07$  и т.д. (при вычислении значений вероятностей используются биномиальные коэффициенты). К примеру, для обеспечения риска не более 0,002 следует использовать 10 исполнителей, что в два раза больше минимального необходимого их числа; для обеспечения риска проекта не выше риска одного исполнителя (0,15), следует использовать 7 исполнителей и т.д.

Если исполнители независимы, то оптимальное их число и риск проекта достаточно просто вычисляются методами теории вероятностей. При взаимозависимых исполнителях и сложной зависимости надежности проекта от надежностей исполнителей МП следует применять более сложные модели.

Совершенно очевидно, что при ненадежных исполнителях затраты на производство продукции (например, пропорциональные числу исполнителей) существенно больше, чем в случае абсолютно надежных исполнителей. Введение аппаратной избыточности, помимо повышения надежности и дополнительных затрат, имеет и другие аспекты. Если МП ориентируется на выпуск определенного объема продукции, то при  $p < 1$  он должен привлекать большее количество исполнителей, чем минимально необходимое. Поскольку отказ исполнителя есть случайная величина, то ожидаемый объем производства есть «усредненный» показатель. В действительности могут отказать столько исполнителей, что проект будет невыполнен, в связи с чем МП понесет расходы. Но возможна и другая ситуация, когда



все исполнители сработают без срывов. В этом случае произведенный объем выпуска окажется больше требуемого. Если МП сможет реализовать эту «лишнюю» продукцию, то будет получена дополнительная прибыль. Если «излишки» продать не удастся, то МП несет расходы, т.к. на производство продукции произведены затраты. Данные рассуждения показывают, что при зависимости результата проекта от неопределенных и случайных факторов, выбор МП критериев оптимальности играет определяющую роль.

Часто МП приходится решать следующую проблему: какой вариант выгоднее – для выполнения работы привлечь одного высоконадежного и высокооплачиваемого исполнителя или  $n > 1$  менее надежных, требующих меньшей оплаты? Пусть доход МП от выполнения проекта равен  $D$ , затраты на оплату надежного исполнителя с вероятностью отказа  $p_0$  равны  $Z_0$ , а одного ненадежного (вероятность отказа  $p \gg p_0$ ) –  $Z \ll Z_0$ . Сравнивая ожидаемые затраты МП, получаем, что привлечение  $n$  ненадежных исполнителей будет выгоднее, если

$$(1-p)^n D - nZ \geq (1-p_0)D - Z_0 .$$

Итак, выше были рассмотрены некоторые элементарные примеры, иллюстрирующие применение аппаратной избыточности (включение в состав проекта дублирующих (резервных) исполнителей для повышения его надежности). Выбор уровня избыточности (количества дублирующих исполнителей) определяет объем необходимых затрат. Построение модели проекта, адекватно связывающей надежность (риск) и затраты, позволяет определить оптимальное число исполнителей проекта и оптимальное распределение финансов между ними, обеспечивающие заданную надежность.

Несмотря на то, что введение дублирующих исполнителей является широко используемым методом повышения надежности, в ряде случаев простое дублирование является не очень эффективным. Действительно, представим научный проект, цель которого заключается в разработке нового изделия. Каждый исполнитель разрабатывает один узел этого изделия. Аппаратная избыточность означает, что два коллектива исполнителей будут разрабатывать один и тот же узел. Вряд ли это эффективно. Можно тогда для повышения надежности пойти другим путем – ввести исполнителей, различающихся по своим функциям – один, к примеру, разрабатывает один узел, другому поручена разработка другого узла, а третий исполнитель разрабатывает некоторые части обоих узлов. В этом случае при отказе первого исполнителя (характеристики разработанного им узла не удовлетворяют предъявленным требованиям), разработки второго и третьего исполнителей позволят создать новое изделие. Такое дублирование функций, а не исполнителей, называется функциональной избыточностью. В этом случае также возникает проблема «риск – затраты». С увеличением числа взаимозаменяемых исполнителей повышается надежность,

что влечет за собой повышение затрат. Задача МП заключается в нахождении оптимального соотношения между затратами и надежностью.

Пусть проект описывается набором требований  $\tilde{F}$ -функций, реализацию которых исполнители должны завершить к моменту окончания проекта  $F = (f_1, \dots, f_n)$ , где  $f_i$  – функция, выполняемая  $i$ -м исполнителем. Будем называть множество исполнителей, которые обладают набором функций  $F$ , функционально полным относительно требований проекта  $\tilde{F}$ , если каждая функция из  $\tilde{F}$  реализуется одним исполнителем или комбинацией нескольких. Понятно, что одни и те же цели могут быть достигнуты различными путями, в общем случае могут существовать много коллективов-исполнителей, функционально полных в  $\tilde{F}$ . Множество исполнителей называется минимально полным, если при отказе хотя бы одного из них происходит потеря функциональной полноты – отказ проекта в целом. В случае возможности замены одной из функций какого-либо исполнителя комбинацией функций прочих исполнителей, эта функция является избыточной, а множество исполнителей называется функционально избыточным.

Решая задачу формирования оптимального набора исполнителей проекта МП должен:

- сформулировать набор  $\tilde{F}$  требований к проекту;
- выбрать функционально полные подмножества исполнителей относительно  $\tilde{F}$  из множества потенциальных;
- определить надежность проекта и необходимые затраты для каждого выбранного подмножества;
- определить оптимальную комбинацию надежности и соответствующих затрат, удовлетворяющую заданным ограничениям.

Покажем технологию использования выше приведенного алгоритма на примере. Пусть цель проекта – произвести некоторый продукт, для которого требуется  $X_1$  единиц комплектующих деталей 1-го типа и  $X_2$  единиц комплектующих деталей 2-го типа. Имеются потенциальные исполнители трех видов:

Вид 1. Производят  $x_1$  единиц продукции 1-го типа. Вероятность отказа (риск) –  $p_1$ . Затраты –  $Z_1$ .

Вид 2. Производят  $x_2$  единиц продукции 2-го типа. Риск –  $p_2$ . Затраты –  $Z_2$ .

Вид 3. Перерабатывают  $y_1$  единиц продукции 1-го типа в  $y_2$  единиц продукции 2-го типа. Риск –  $p_3$ . Затраты –  $Z_3$ .

Набор требований к проекту  $\tilde{F} = (X_1, X_2)$  дают возможность определить допустимые комбинации исполнителей (функционально полные относительно  $\tilde{F}$ ). Пусть  $n_1, n_2, n_3$  – количество исполнителей 1-го, 2-го и 3-го видов, участвующих в проекте. Возьмем конкретные значения  $X_1 = X_2 = 1$ ;  $x_1 = 0, 6$ ;  $x_2 = 0, 7$ ;  $y_1 = 0, 2$ ;  $y_2 = 0, 3$ .

При абсолютно надежных исполнителях, очевидно, достаточно взять  $(n_1 = 2, n_2 = 2, n_3 = 0)$  или  $(n_1 = 4, n_2 = 0, n_3 = 4)$ ,  $(n_1 = 2, n_2 = 1, n_3 = 1)$ , и т.п. с большим числом исполнителей. Данные наборы исполнителей минимально полные – при отказе любого из них производство одного из типов продукции становится строго меньше единицы. В данном примере функции исполнителей (возможности производства) разных видов различны, в отличие от выше рассматриваемых примеров при исследовании аппаратной избыточности.

Пусть суммарные затраты не должны превышать  $R$ , и общее количество исполнителей не превышает  $N$ . Тогда для нахождения допустимых наборов исполнителей необходимо решить следующую систему неравенств:

$$\begin{cases} N_1 x_1 - n_3 y_1 \geq X_1 \\ n_2 x_2 - n_3 y_2 \geq X_2 \\ N_1 + n_2 + n_3 \leq N \\ N_1 Z_1 + n_2 Z_2 + n_3 Z_3 \leq R \\ N_1, n_2, n_3 \in \mathcal{N}, \end{cases} \quad (2.8.1)$$

где  $\mathcal{N}$  – натуральные числа.

Для повышения надежности в случае возможных отказов исполнителей следует увеличивать минимально полные наборы. Наборы  $(n_1 = 3, n_2 = 3, n_3 = 0)$ ,  $(n_1 = 3, n_2 = 1, n_3 = 2)$  и т.п. имеют избыточные элементы. Пусть  $N = 6$ ,  $R = 11$ ,  $p_1 = 0, 1$ ,  $p_2 = 0, 2$ ,  $p_3 = 0, 15$ ,  $Z_1 = 2$ ,  $Z_2 = 3$ ,  $Z_3 = 1$ . Тогда допустимыми вариантами состава исполнителей являются следующие (табл. 2.8.1).

Видим, что варианты 1 и 2 являются минимально полные, но они имеют самую низкую надежность. Варианты 4 и 5 также обладают небольшой надежностью. Варианты 3–5 обладают избыточностью. В 3-м варианте, если откажет либо один исполнитель 2-го вида (произойдет переход к варианту 1), либо откажет один исполнитель 3-го вида (произойдет переход к варианту 2), то сохранится функциональная полнота, то есть система неравенств (2.8.1) по-прежнему удовлетворяется. При отказе одного исполнителя 1-го вида в 4-ом варианте или одного исполнителя 3-го вида в 5-ом варианте жизнеспособность проекта также сохраняется.

Анализируя варианты 1–5, МП, скорее всего, выберет 3-й вариант, как обеспечивающий максимальную надежность. Можно, однако, сэкономить затраты, снизив надежность, выбрать, например, вариант 4 или использовать большее число исполнителей, выбрав 5-й вариант (если количество рабочих мест существенно для МП). При анализе надежности проекта мы предполагали, что МП достоверно известны характеристики исполнителей – их производственные возможности, надежность и т.п. Данные об этих характеристиках могут быть получены либо при анализе статистических данных, либо в результате экспертных исследований, либо от самих исполнителей (в крайнем случае). В последнем случае МП сталкивается с проблемой манипулируемости, и он вынужден будет разработать специ-

альные механизмы предотвращения искажения информации: вводить штрафы за искажение информации, строить эквивалентные прямые механизмы и т.п.

Таблица 2.8.1

Варианты	Исполнители	Число исполнителей	Затраты	Надежность
1	$n1 = 2, n2 = 1, n3 = 1$	4	8	0.55
2	$n1 = 2, n2 = 2, n3 = 0$	4	10	0.52
3	$n1 = 2, n2 = 2, n3 = 1$	5	11	0.74
4	$n1 = 3, n2 = 1, n3 = 1$	5	10	0.58
5	$n1 = 3, n2 = 1, n3 = 2$	6	11	0.57

Таким образом, выше были описаны методы повышения надежности проекта при формировании состава исполнителей – введение функциональной или аппаратной избыточности и их комбинации. При этом на менеджера проекта возлагается решение дилеммы «риск – затраты», ему необходимо выбрать вариант с максимальной надежностью при заданных затратах, или минимизировать затраты на обеспечение фиксированного уровня риска.

Положения, представленные в данной части могут быть дополнены также материалами, содержащимися в [1, 3, 7, 8, 10, 11].

## Библиографический список к части 2

1. Бурков, В.Н. Теория графов в управлении организационными системами / В. Н. Бурков, А.В. Заложнев, Д.А. Новиков. – М: СИНТЕГ, 2001. – 124 с.
2. Бурков, В.Н. Большие системы: моделирование организационных механизмов / В.Н. Бурков, Б. Данев, А.К. Еналеев и др. М.: Наука, 1989. – 246 с.
3. Бурков, В.Н. Модели и методы управления организационными системами / В.Н. Бурков, В.А. Ириков. – М.: Наука, 1994. – 270 с.
4. Бурков, В.Н. Введение в теорию управления организационными системами: учебник / В.Н.Бурков, Н.А.Коргин, Д.А.Новиков; под ред. Д. А. Новикова. – М.: Наука, 2009. – 264 с.

5. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Введение в теорию активных систем / В.Н.Бурков, Д.А.Новиков. – М.: ИПУ РАН, 1996. – 125 с.
6. Вентцель, Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель. – М.: КноРус, 2010. – 368 с.
7. Гельруд, Я.Д. Управление проектами: методы, модели, системы: монография /Я.Д. Гельруд, О.В. Логиновский; под ред. д-ра техн. наук проф. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 330 с.
8. Давыдов, В.Г. Исследование операций / В.Г.Давыдов. – М.: Высшая школа, 1990. – 383 с.
9. Мулен, Э. Кооперативное принятие решений: аксиомы и модели / Э. Мулен. – М.: Мир, 1991. – 464 с.
10. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: монография/ О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков, и др.; под ред. д.т.н., проф. О.В. Логиновского, д.т.н., проф. А.А. Максимова. – М.: ИНФРА–М, 2017. – 410 с.
11. Korennaya, K.A. Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations. / K.A. Korennaya, O.V Loginovsky, A.A.Maksimov, A.V. Zimin // Under editorship of D. Sc., prof. Shestakov A.L. – Kostanay : State University, Kostanay, 2014. 227 p.

## ЧАСТЬ 3. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ ДЛЯ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ СТОРОН

### Глава 3.1. Модели и механизмы управления проектами для инвестора

В настоящей главе рассматриваются математические модели, которые предназначены для проектного управления со стороны инвестора на всех стадиях реализации проекта. В каждом предлагаемом варианте анализируются специфические условия, адекватные данной модели, при этом рассматриваются методы решения, которые могут быть многовариантны. Применение данных моделей способствует повышению эффективности деятельности инвестора, реализации его компетенций и достижению поставленных целей при разных условиях реализации проекта.

*Инвестор* – это физическое или юридическое лицо, вкладывающее в проектную деятельность собственные, заемные или привлеченные средства. Инвестор осуществляет капитальные вложения на территории Российской Федерации в соответствии с законодательством страны (Федеральный закон от 25 февраля 1999 г. № 39-ФЗ «Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений» и ГК РФ). Инвестором может быть физическое лицо, а также юридические лица, созданные по договору о совместной деятельности. Кроме того, это могут быть органы местного самоуправления, государственные органы, а также иностранные субъекты. Инвесторы сами определяют объемы, размеры, направления и эффективность инвестиций и сами привлекают по договорам физические или юридические лица, которые необходимы им при реализации инвестиций.

Залогом успеха инвестора является тщательный отбор инвестиционных проектов. Американская инвестиционно-консалтинговая компания Baganov International Group произвела оценку множества бизнес-предложений и определила, что только одно из десяти получает финансирование. Доля проектов, получающих инвестиции в России, еще меньше в силу небольшого числа отечественных инвесторов. Анализ и отбор проектов сильно варьируется в зависимости от привычек и пристрастий конкретных инвесторов. Основные источники информации о проектах – это описания прогнозных значений прибыли (по векам, по годам) и возможных рисков инвестора.

Инвестиции, в любом случае, предназначены для получения прибыли при низкой степени риска (на практике, чаще всего, высокая прибыльность достигается при высокой степени риска). Кроме того, для инвестора желательна высокая степень ликвидности вложений, которая зависит от легкости и быстроты нахождения инвестором покупателя на свою часть проекта (при досрочном расторжении договора с заказчиком).

Специфические параметры и характеристики проектной деятельности со стороны инвестора приведены в табл. 3.1.1 (строка 1).

*Постановка задач инвестора*

Задачи оптимального распределения финансов между некоторыми инвестиционными проектами подробно исследованы в [4, 20]. Каждый рассматриваемый инвестиционный проект с точки зрения финансов описывается в виде временного ряда чистых денежных потоков, порожденных проектом. Кроме того, каждый инвестиционный проект (инвестиционный замысел) имеет конкретное время актуальности, его выполнение может быть начато и закончено в определенном временном интервале. Таким образом, математическая постановка задачи оптимизации инвестиционного портфеля заключается, во-первых, в выборе подмножества проектов, подлежащих выполнению, а во-вторых, в определении временного графика их реализации. Основной проблемой, которую при этом необходимо решать, является распределение инвестором определенного объема финансов по разным альтернативным вариантам вложения, включая доленое участие в некоторых проектах, обеспечивающее наилучшим образом достижение своих целей.

Прежде всего, инвестор стремится получить максимальную прибыль от инвестированных средств. Так как любое вложение капитала влечет не только получение ожидаемого дохода, но и постоянную опасность проигрыша, то в оптимизационных задачах формирования инвестиционного портфеля необходимо обязательно учитывать и риски. Преимущество инвестиционного портфеля заключается в улучшении условий инвестирования, в придании совокупности проектов таких инвестиционных характеристик, которые были бы недостижимы на каждом отдельно взятом проекте и оказались возможными только при их комбинации.

В данной главе рассматривается проблема финансирования сложного комплексного проекта, который представлен планом по пусковым комплексам (вехам). Возникающие при этом различные варианты реализации проекта отличаются сроками ввода отдельных пусковых комплексов в эксплуатацию, потоками прогнозируемой прибыли, допустимыми объемами финансирования, оценками степени риска неполучения прибыли (в заданных пределах) и ликвидности проекта. Способы формирования временных чистых денежных потоков при разных типах инвестиционных проектов разные, также различны и методы оценки рисков.

Риск неполучения планируемой прибыли (вариация доходности) может рассчитываться с использованием статистического показателя – среднеквадратическое отклонение. Формирование инвестиционной стратегии будем производить, рассматривая динамические прогнозы денежных и материальных потоков, представленные бизнес-планами по вехам с оценками этих будущих потоков, а указанные выше параметры будем считать заданными для каждого предлагаемого варианта реализации проекта в плани-

руемое время, причем для обеспечения общности рассматриваемых моделей будем считать эти параметры зависимыми от начала инвестиций. В последующем изложении мы будем использовать известные модели оптимизации инвестиционного портфеля, а также оригинальные модели для сложного проекта, представленного совокупностью возможных альтернатив его реализации.

Отметим, что исходной информацией для рассматриваемых далее моделей, является план по вехам проекта, формируемый командой проекта на базе стохастической сетевого графика. При расчете основных показателей проекта, входящих в описание представленных моделей, используется их стохастический характер.

*Основная математическая модель функционирования инвестора*

*Исходные данные модели:*

$I_t^k$  – необходимый объем инвестиций в вариант  $k$  проекта в  $t$ -й период;

$V_t^k$  – прогнозная прибыль от реализации варианта  $k$  проекта в  $t$ -й период;

$B_t^{max}(r)$  – максимально возможная сумма кредитования в  $t$ -й период по ставке  $r$ ;

$B_t^\tau$  – планируемый объем погашения в  $t$ -й период кредита (процентов и основного долга), взятого в период  $\tau$  в сумме  $B_\tau$ ;

$Q_t$  – объем собственных средств инвестора, которые им могут быть вложены в проект в  $t$ -й период;

$r_{min}$  – размер минимально возможной ставки кредитования;

$d$  – размер ставки дисконтирования.

Объем чистого дисконтированного дохода (NPV)  $k$ -го варианта проекта с объемом финансирования собственными силами  $x_t^k$  будем вычислять по формуле:

$$NPV^k = \sum_{t=1}^n \frac{V_t^k - x_t^k - \sum_{\tau=0}^{t-1} B_t^\tau}{(1+d)^{-t}}. \quad (3.1.1)$$

Постановка задачи: необходимо найти объем финансирования собственными силами и суммы кредитования проекта по периодам, удовлетворяющие ограничениям по наличию собственных средств, по заданному объему инвестиций и по допустимым объемам кредитования, при этом обеспечить максимум чистого дисконтированного дохода.

Математическая модель задачи имеет следующий вид:

необходимо найти  $\{x_t^k\}$  – объемы финансирования собственными силами,  $B_t(r)$  – объемы кредитования проекта в  $t$ -й период по ставке  $r$  и такой вариант  $k_3$ , который обеспечивает:

$$NPV^{k_3} = \max_k NPV^k; \quad (3.1.2)$$

$$I_t^k = x_t^k + B_t(r) \quad (3.1.3)$$

– необходимый объем инвестиций;



$$B_t(r) \leq B_t^{\max(r)} \quad (3.1.4)$$

– ограничение по объемам кредитования;

$$x_{t \leq}^k \leq Q_t \quad (3.1.5)$$

– ограничение по собственным средствам;

$r \geq r_{\min}$  – ограничение по ставке кредитования.

Данная модель реализует компетенции, которые входят в состав специфических параметров и характеристик управления проектом со стороны инвестора. Целевая функция (3.1.2) соответствует ожиданиям (возврату вложений с максимально допустимой прибылью), цели в проекте (получить прибыль путем инвестирования) и критериям (максимизация прибыли), ограничения (3.1.3)–(3.1.5) соответствуют видению проекта (процесс движения денег, динамика затрат и доходов), кредитным ставкам, заданным объемам инвестирования, срокам, планированию и прогнозу.

Элементы стратегии (контроль и регулирование), реализуются посредством получения фактических данных об объемах инвестирования (и объемах кредитования), последующей корректировкой прогнозной информации и пересчетом задачи по данной модели (при возникшей необходимости).

Риски недополучения прибыли и невозврата кредитов учитываются в дополнительном ограничении:

$$V_t^* \geq V_t^{\min}, \quad (3.1.6)$$

где  $V_t^{\min}$  – объем прибыли, гарантирующий минимальную желаемую норму прибыли и возврат кредитов.

Данная модель использует основные инструменты УП, которые соответствуют заинтересованной стороне - инвестор: план по векам, бюджет, план финансирования, бизнес-план. Результатом функционирования модели является формирование сводной отчетности. Таким образом, использование предложенной модели обеспечивает выполнение всех основных функций УП, что существенно повышает эффективность деятельности инвестора.

*Математическая модель минимизации риска и максимизации ожидаемой прибыли в деятельности инвестора при постоянных объемах финансирования*

Пусть у инвестора имеются в наличии финансовые средства в объеме  $Q = \sum_{t=0}^T Q^t$  в интервале  $[0, T]$ . Можно использовать эти средства для вложения в  $k$ -й ( $k = 1, \dots, n$ ) вариант проекта, требующий объем финансирования  $V_k^t$  в период  $t$ . Пусть  $NPV_k^t$  – чистый дисконтированный доход  $k$ -го варианта проекта на начало  $t$ -го периода, а  $r_k^t$  – прогноз оценки риска недополучения прибыли. Требуется определить такой вариант выполнения проекта и соответствующие ему объемы инвестиций, обеспечивающие максимум ожидаемой доходности для заданного уровня риска или минимальный размер риск для ожидаемого значения доходности.

Выбор варианта реализации проекта формулируется в виде следующей двухкритериальной задачи целочисленного программирования.

Требуется найти:

$$x_k = \begin{cases} 1, & \text{если происходит инвестирование в вариант } k\text{-й проект,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

при ограничениях:

$$\sum_{k=1}^n V_k^t \cdot x_k \leq Q^t, \forall t \in [0, T]. \quad (3.1.7)$$

Целевые функции:

максимизация ожидаемой доходности:

$$F_1 = \sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^n x_k \cdot NPV_k^t \right) (1+d)^{-t} \rightarrow \max; \quad (3.1.8)$$

минимизация риска:

$$F_2 = \sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^n x_k \cdot r_k^t \right) (1+d)^{-t} \rightarrow \min. \quad (3.1.9)$$

Оценку риска  $r_k^t$  рассматриваем в виде среднеквадратичного отклонения ожидаемого чистого дисконтированного дохода от вложений в проект  $k$ , начатый в  $t$ -й период в объеме  $V_k^t$  от других возможных реализаций проекта, начинающихся в тот же период. Оценки риска имеют размерность, аналогичную  $V_k^t$  и  $NPV_k^t$ . Величину коэффициента дисконтирования  $d$  примем в качестве минимально желаемого уровня доходности инвестиций. Мы в дальнейшем не будем производить свертку критериев, а используем метод последовательных уступок, поэтому коэффициент дисконтирования  $d$  будет применен и ко второй целевой функции как мера эквивалентности значений среднеквадратичного отклонения доходности различных временных периодов.

При решении поставленной задачи используем метод последовательных уступок, который заключается в следующем: сначала решаем задачу (3.1.7)–(3.1.8) не учитывая второй критерий (3.1.9). Получаем решение  $\{x_k(1)\}$  при значении 1-й целевой функции  $F_1^1$ . Затем вычисляем значение 2-го критерия  $F_2^1$  при полученном решении. Уменьшаем значение первого критерия (например, на 5%) –  $F_1^2 = 0,95F_1^1$  и переводим его в ограничение:

$$\sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^n x_k \cdot NPV_k^t \right) (1+d)^{-t} \geq F_1^2. \quad (3.1.10)$$

На втором этапе решается исходная задача (3.1.7)–(3.1.8) при дополнительном ограничении (3.1.10), в которой минимизируется вторая целевая функция (3.1.9). В результате получается новое решение  $\{x_k(2)\}$ , у которо-

го значение первой целевой функции будет  $F^2_1 \leq F^1_1$ , а второго критерия  $F^2_2 \geq F^1_2$ . Продолжая этот пошаговый процесс, получим последовательно набор решений  $\{x_k(1)\}$ ,  $\{x_k(2)\}$ , ...,  $\{x_k(N)\}$ , имеющих соответствующие значения критериев.

Каждое полученное решение этого набора является Парето-оптимальным, образуя множество вариантов, которые могут быть приняты к реализации. Полученная упорядоченная последовательность вариантов проекта обладает следующим свойством: каждый последующий вариант имеет меньшую прибыльность, при этом убывает и риск ее недополучения. Выбранные варианты наглядно показывают тесную взаимосвязь между прибыльностью и риском и дают возможность принять мотивированный вариант проекта.

Представленная выше постановка задачи выбора варианта проекта обеспечивает определенным образом определение объема годовых инвестиций в него –  $V^t_k$ .

*Математическая модель деятельности инвестора при переменных объемах финансирования*

Введем усложнение задачи, допустив варьирование объемов инвестиций в проекты  $k$  ( $k = 1, \dots, n$ ) в период  $t$  в пределах от  $V^{t}_{kmin}$  до  $V^{t}_{kmax}$ . Пусть NPV варианта  $k$  проекта на начало периода  $t$  составляет при минимальном и максимальном объеме инвестиций соответственно  $NPV^{t}_{kmin}$  и  $NPV^{t}_{kmax}$ , а прогнозы оценок риска –  $r^{t}_{kmin}$  и  $r^{t}_{kmax}$ . Анализ статистической информации показал постоянную эластичность чистого дисконтированного дохода при частично инвестируемом проекте, поэтому его можно описать степенной функцией  $X^\alpha$ , где  $X$  – объем инвестиций,  $\alpha$  – коэффициент эластичности.

Имеем  $NPV^{t}_{kmax} = NPV^{t}_{kmin} \left( \frac{V^{t}_{kmax}}{V^{t}_{kmin}} \right)^\alpha$ , откуда:

$$\alpha = \frac{\ln(NPV^{t}_{kmax}) - \ln(NPV^{t}_{kmin})}{\ln(V^{t}_{kmax}) - \ln(V^{t}_{kmin})}. \quad (3.1.11)$$

Прогнозируемая оценка риска выражается функцией  $X^\beta$ , где:

$$\beta = \frac{\ln(r^{t}_{kmax}) - \ln(r^{t}_{kmin})}{\ln(V^{t}_{kmax}) - \ln(V^{t}_{kmin})}. \quad (3.1.12)$$

В этом случае вид математической модели выбора варианта проекта следующий:

Требуется найти:

$$x_k = \begin{cases} 1, & \text{если инвестиции производятся в вариант проекта } k, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.1.13)$$

$V^t_k$  – объемы инвестирования в вариант проекта  $k$  в период  $t$ , удовлетворяющие ограничениям:

$$V^{t}_{kmin} \leq V^t_k \leq V^{t}_{kmax}, \quad (3.1.14)$$

$$\sum_{k=1}^n V_k^t \cdot x_k \leq Q^t, \forall t \in [0, T]. \quad (3.1.15)$$

Целевые функции:

максимизация ожидаемой доходности:

$$F_1 = \sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^n x_k \cdot (V_k^t)^\alpha \right) \rightarrow \max; \quad (3.1.16)$$

минимизация риска:

$$F_2 = \sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^n x_k \cdot (V_k^t)^\beta \right) (1+d)^{-t} \rightarrow \min, \quad (3.1.17)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  определяются по формулам (3.1.11) и (3.1.12).

Предложенная модель позволяет определять объемы частичного инвестирования в пусковые комплексы в допустимых размерах, при этом проект в целом обладает максимальной доходностью, обеспечивая приемлемый (заданный) уровень риска.

*Модель деятельности инвестора, обеспечивающая максимальную степень ликвидности проекта*

Ликвидность проекта зависит от факторов, которые определяются спецификой проекта. Такими факторами в предлагаемой ниже модели являются объемы финансирования проекта и отдельных его пусковых комплексов, сроки выполнения отдельных этапов и проекта в целом.

Пусть функция  $F(K, T)$  определяет зависимость степени ликвидности проекта от векторов  $K$  и  $T$ , где вектор  $K$  соответствует объемам финансирования проекта по отдельным его пусковым комплексам, а вектор  $T$  соответствует срокам выполнения проекта по его отдельным этапам. Значения этой функции определяются экспертно, на дискретном множестве вариантов проекта  $P(K, T)$ , которые также зависят от векторов  $K$  и  $T$ . Каждый возможный (допустимый) вариант плана выполнения проекта  $k \in P(K, T)$  должен удовлетворять системе ограничений модели, которая состоит из ресурсных (3.1.14–3.1.15) и временных ограничений:

$$t_{ij}^k \leq T_j^k - T_i^k,$$

где  $t_{ij}^k$  – длительность работы (i, j) укрупненного сетевого графика варианта проекта k,

$T_i^k$  – срок свершения события i укрупненного сетевого графика варианта проекта k.

В зависимости от вида проекта  $F(K, T)$  может иметь специфический характер. Планируется в дальнейшем разработка методических рекомендаций по формированию функции зависимости степени ликвидности для проектов разного типа и сложности. Помимо этого, должны быть учтены дополнительные временные ограничения по срокам выполнения отдельных этапов проекта.

В данной модели целевой функцией является  $F(K, T)$ , т.е. максимизируется степень ликвидности проекта, соблюдая временные и ресурсные ограничения.

### *Многокритериальная математическая модель деятельности инвестора*

Пусть модель, рассмотренная в предыдущем пункте, включает еще целевые функции (3.1.16) и (3.1.17). Сформированная таким образом математическая модель описывает задачу выбора варианта финансирования проекта, который удовлетворяет ресурсным и временным ограничениям, максимизирует прибыльность, минимизирует риски и имеет максимум степени ликвидности. Набор альтернатив реализации проекта  $P(K, T)$  формирует команда проекта, использующая при этом альтернативную и стохастическую структуру сетевой модели проекта. Вместе с набором альтернатив  $P(K, T)$  формируются варианты планов, обеспечивающих проект необходимыми ресурсами, а также варианты планов налогообложения. Указанные варианты планов в процессе согласования с поставщиком и заказчиком получают, в свою очередь, оценки степени ликвидности, которые связаны с требованиями заказчика и возможностями поставщика. При включении в модель вышеприведенных критериев отбора вариантов возникает многокритериальная задача выбора варианта реализации проекта. Задача в общем случае не имеет решения, т.е. план реализации проекта, удовлетворяющий всем перечисленным критериям, не существует, но теория и практика решения подобных задач имеет некоторые методологические подходы, которые обеспечивают выбор приемлемых вариантов. Данные методы подробно будут рассмотрены ниже.

### **Глава 3.2. Модели и механизмы управления проектами для заказчика**

Модели и механизмы, которые предназначены для управления проектом при участии заинтересованной стороны – заказчика проекта представлены в данной главе. В явном виде формулируется задача управления его конфигурацией. Использование предложенных моделей должно способствовать повышению эффективности деятельности заказчика, обеспечению реализации его компетенций и достижению поставленных целей в различных условиях реализации проекта.

Обычно заказчиком выступает физическое или юридическое лицо, владелец продукта проекта в будущем, именно в его интересах и выполняется проект.

Основной функцией заказчика является выполнение комплекса мероприятий, целью которых является достижение конечного результата проекта совместно с другими участниками.

Главным объектом проектной деятельности заказчика является предметная область проекта, в том числе:

– *управление требованиями*. Включает процедуры управления требованиями заказчика к конечному результату проекта, а также к оборудованию,

материалам и услугам, включающих их качественные и количественные характеристики.

– *управление конфигурацией проекта и продукта*. Включает процедуры, которые используются для административного и технического руководства работами, связанными с осуществлением проекта, его поддержанием и контролем изменений в конфигурации продукта и проекта на протяжении всего его жизненного цикла.

– *управление составом работ*. Включает процессы, которые необходимы для включения в проект всех требуемых работ и только тех работ, которые требуются для успешного выполнения проекта.

Специфические характеристики и параметры проектной деятельности в интересах заказчика приведены в табл. 3.2.1 (строка 2).

*Математическая модель деятельности для заказчика, обеспечивающая минимальную степень изменения конфигурации проекта*

Исходная информация: укрупненный комплексный план проекта, представленный обобщенной сетевой моделью, которая разработана командой проекта, использующей детализированную сетевую модель проекта. Последняя модель в свою очередь разработана и используется менеджером проекта, его командой и генеральным подрядчиком. При этом известны следующие данные:

$T_i^p, T_i^n$  – значения ранних и поздних сроков свершения  $i$ -х событий укрупненного графика;

$a_{ij}, b_{ij}$  – значения минимальных и максимальных оценок продолжительности работ сетевой модели;

$r_{ij}$  – затраты на выполнение работ укрупненной сетевой модели;

$I_t$  – размеры бюджетных ограничений временного интервала  $t$  (месяц, квартал, год);

$ЭОК_{ij}$  – значения экспертных оценок максимально допустимой степени изменения конфигурации проекта.

На изменение конфигурации проекта влияет нарушение сроков выполнения работ, исключение работ из плана реализации и их замена. По каждой работе экспертно оценивается по десятибалльной системе степень изменения конфигурации:

$\alpha_{ij}(t)$  – баллы за нарушение срока выполнения работы ( $i, j$ ) на  $t$  дней;

$\beta_{ij}$  – баллы за исключение работы ( $i, j$ ) из реализации;

$\gamma_{ij}$  – баллы за изменение характеристик работы или ее замену,

где значения баллов  $\alpha, \beta, \gamma$ , близкие к 0, соответствуют малозначимым изменениям, близкие к 5 – среднезначимым, близкие к 10 – недопустимым изменениям. Остальные значения баллов используются для промежуточных оценок состояний.

Степень изменения конфигурации всего проекта определим как интегрированный показатель (ИПК), который задается некоторой функцией ФОК (определяемой экспертами). Экспертиза использует показатели каче-

ства  $PK_{ij}$  производства работ укрупненного графика, задаваемые также экспертно. Проведенный авторами анализ статистики большого числа проектов показывает, что все эти функции являются возрастающими, вогнутыми, т.е. имеют положительные 1-е и 2-е производные (значения их возрастают, как и темпы роста). При малых изменениях конфигурации работ функции ФОК рассматриваются как степенные с показателем степени  $a > 1$ . Данный показатель  $a$  есть эластичность функции, он показывает, на сколько % возрастает значение степени изменения конфигурации, если качество реализации отдельных работ изменяется на один %.

#### *Вербальная постановка задачи*

Необходимо разработать укрупненный календарный график реализации проекта, который удовлетворяет ограничениям по качеству выполнения этапов и отдельных работ, по объемам финансирования и директивным срокам, учитывает показатель надежности проекта и при этом минимизирует степень изменения конфигурации всего проекта.

Математическая модель задачи выглядит следующим образом:

Необходимо найти сроки свершения событий  $T_i$  укрупненного графика и продолжительности работ  $t_{ij}$  этого графика, при которых:

$$T_i^p \leq T_i \leq T_i^n \quad (3.2.1)$$

$$a_{ij} \leq t_{ij} \leq b_{ij} + \delta_{ij}, \quad (3.2.2)$$

где  $\delta_{ij}$  – допустимое нарушение продолжительности выполнения работы  $(i, j)$ ;

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_t} r_{ij} \cdot \lambda_{ij}^t \leq I_t, \quad (3.2.3)$$

– ограничение на объемы финансирования в период  $t$ , где  $\Omega_t$  – множество работ, реализуемых в интервале  $t$ ,  $\lambda_{ij}^t$  – доля работы  $(i, j)$ , реализуемой в период  $t$ .

$$\alpha_{ij}(\delta_{ij}) + \beta_{ij} + \gamma_{ij} \leq ЭОК_{ij}; \quad (3.2.4)$$

Данная модель учитывает суммарный риск проекта, который заключается в риске недостижения целей, определяющем надежность проекта. Под надежностью проекта при этом понимается свойство проекта быть реализованным в определенных условиях внешней среды с одной стороны, а с другой стороны – количественная оценка проекта, однозначно увязывающая вероятность его реализации со сроками или другими параметрами процесса реализации при заданных условиях.

Количественная оценка надежности использует как отдельные показатели надежности, характеризующие одно свойство надежности, так и комплексные показатели, которые характеризуют набор свойств надежности.

К таким показателям могут быть отнесены: оценка вероятности успешного (своевременного или досрочного) завершения проекта, степень го-

товности и соответствия фазы выполнения проекта графику, положительная репутация Заказчика и способность его выполнять все обязательства перед другими *стейкхолдерами*, аккредитация в банках, нагрузка обременений, страховые гарантии, конкурентное окружение, состояние разрешительной документации, схема продаж и пр.

В [19] рассматривается модель надежности проекта, представляющего собой сложную техническую систему, в которой количественным показателем надежности отдельной работы принимается вероятность безотказного ее выполнения  $P_{\text{над}}$ , а показателем надежности всего проекта является гарантированная оценка снизу  $O_{\text{над}}$ . Основываясь на этих оценках, формулируется задача календарного планирования с ресурсными ограничениями и с учетом показателей надежности проекта. Предложенные показатели надежности проекта и метод их расчета представляется целесообразным использовать для рассматриваемой модели функционирования заказчика. В качестве исходного сетевого графика рассматривается комплексный укрупненный план проекта, представленный обобщенной сетевой моделью. Таким образом, математическая модель поставленной задачи выглядит следующим образом:

$$P_{\text{над}} \geq O_{\text{над}}, \quad (3.2.5)$$

$$\Phi OK(PK_{ij}) \rightarrow \min, \quad (3.2.6)$$

где вектор значений коэффициентов качества выполнения работ укрупненного плана является аргументом функции  $\Phi OK$ .

Целевая функция (3.2.6) определяется экспертами эмпирическим путем и может иметь весьма специфический характер, зависящий от вида проекта.

Использование данной модели позволяет сформировать укрупненный график выполнения работ, обеспеченный финансированием, оптимальный по качеству и обладающий необходимой степенью надежности.

Рассматриваемая модель (и все последующие) имеет детерминированные параметры обобщенного укрупненного сетевого графика. Альтернативные и вероятностные сети проанализированы подробно в [5] и нами будут использоваться в математических моделях деятельности команды проекта. В этом же пункте будет рассмотрен алгоритм расчета показателей, необходимых для оценки уровня надежности, входящей в ограничение (3.2.5). Некоторые рассмотренные в данной главе показатели будут заменены на их  $p$ -квантильные оценки.

Специфика модели заключается в экспертном определении отдельных показателей качества проекта (степени изменения конфигурации каждой укрупненной работы и оценки их допустимых значений), а также в экспертном задании вида целевой функции, которая служит для вычисления обобщенного показателя качества проекта. Создание универсальной системы перечисленных показателей представляется нецелесообразным в си-



лу уникальности проектов и разной важности входящих в них работ, поэтому проведение представителями заказчика экспертизы качества выполнения работ и получение соответствующих оценок является логичным и обоснованным.

*Математическая модель функционирования заказчика,  
минимизирующая значение степени отклонения проекта  
от плана его финансирования*

Дано: обобщенная сетевая модель комплексного укрупненного плана проекта (аналогично модели 3.2.2).

$T_i^p, T_i^n$  – ранние и поздние сроки свершения  $i$ -х событий в укрупненном сетевом графике;

$a_{ij}, b_{ij}$  – минимальная и максимальная оценка продолжительности работы  $(i, j)$  укрупненного сетевого графика;

$r_{ij}$  – затраты на выполнение работы  $(i, j)$  укрупненного графика;

$I_t$  – ограничения бюджета временного интервала  $t$  (месяц, квартал, год);

$\text{ЭОК}_{ij}$  – экспертная оценка предельно возможной степени изменения конфигурации у работы  $(i, j)$ .

Изменение конфигурации проекта – это, также как и в 3.2.2, нарушение сроков производства работ, исключение работ из плана реализации и их замена. Примем обозначения:

$\alpha_{ij}(t)$  – нарушение срока реализации работы на  $t$  дней;

$\beta_{ij}$  – исключение работы из графика реализации;

$\gamma_{ij}$  – замена работы или изменение ее параметров,

где значения коэффициентов  $\alpha, \gamma, \beta$ , близкие к 0, соответствуют мало-значимым изменениям, близкие к 5 – среднезначимым, близкие к 10 – недопустимым изменениям. Другие значения предназначены для промежуточных состояний.

Постановка задачи:

Необходимо сформировать укрупненный график реализации работ, у которого степень изменения конфигурации находится в заданных пределах, имеющего минимальные отклонения от графика финансирования проекта, согласованного с Инвестором.

Математическая модель имеет следующий вид:

Определить сроки свершения событий  $T_i$  укрупненного плана и  $t_{ij}$  - продолжительности укрупненных работ, при которых:

$$T_i^p \leq T_i \leq T_i^n, \quad (3.2.7)$$

$$a_{ij} \leq t_{ij} \leq b_{ij} + \delta_{ij}, \quad (3.2.8)$$

где  $\delta_{ij}$  – допустимое отклонение по срокам выполнения работы  $(i, j)$ ;

$$\alpha_{ij}(\delta_{ij}) + \beta_{ij} + \gamma_{ij} \leq \text{ЭОК}_{ij} \quad (3.2.9)$$

– значение степени изменения конфигурации работы  $(i, j)$  не должно превышать его предельно возможной экспертной оценки.

Целевой функцией в данной модели является взвешенная сумма отклонений от графика финансирования проекта:

$$G = \sum_{\forall t} \mu_t \left| \sum_{(i,j) \in \Omega_t} r_{ij} \lambda_{ij}^t - I_t \right| \rightarrow \min, \quad (3.2.10)$$

где  $\Omega_t$  – перечень работ, выполняемых в  $t$ -м периоде;

$\lambda_{ij}^t$  – часть работы  $(i, j)$ , выполняемой в  $t$ -м интервале;

$\mu_t$  – весовой коэффициент  $t$ -го периода, определяемый экспертно (в ранних периодах он имеет большее значение по сравнению с более поздними периодами, т.к. в ближайших периодах изменить финансирование проекта труднее).

*Математическая модель функционирования заказчика, максимизирующая значение степени качества проекта*

Ниже приводятся вербальные (словесные) постановки задач, математические модели этих задач аналогичны рассмотренным в 3.2.3, их отличает только вид целевой функции. Помимо этого, в 3.2.5 рассматриваются и некоторые методы решения сформулированных задач.

Качество проекта определяется множеством факторов – это экологические, финансовые, социальные, технические и пр. факторы. Зависимость качества проекта от этих факторов определяется спецификой проекта. В данной модели определяющими качеством факторами примем объемы финансирования этапов и проекта в целом, сроки реализации проекта и отдельных пусковых комплексов.

Обозначим  $F(K, T)$  – функцию зависимости качества проекта от размеров финансирования отдельных этапов проекта (вектор  $K$ ) и от сроков выполнения проекта и отдельных пусковых комплексов (вектор  $T$ ). Данная функция определяется экспертно, на дискретном множестве вариантов проекта  $P(K, T)$ . Каждый возможный (допустимый) вариант плана выполнения проекта  $p \in P(K, T)$  должен соответствовать ограничениям модели 3.2.3. Помимо этого, должны быть учтены дополнительные временные ограничения, которые накладывают сроки выполнения отдельных работ или этапов проекта.

В данной модели целевой функцией является  $F(K, T)$ , максимизация качества проекта с соблюдением ресурсных и временных ограничений.

*Математическая многокритериальная модель функционирования заказчика*

Если к модели, рассмотренной в 3.2.4, добавить целевые функции 3.2.6 и 3.2.10, то получим математическую модель задачи формирования плана реализации проекта, который удовлетворяет ресурсным и временным ограничениям и при этом максимизирует качество проекта, минимизирует степень изменения его конфигурации и имеет минимум отклонений от согласованного с инвестором графика финансирования, набор вариантов проекта  $P(K, T)$  формируется командой проекта, при этом формируются

параллельно и варианты графиков налогообложения и графиков обеспечения проекта ресурсами. Эти варианты планов после согласования с поставщиком, регулирующими органами, в свою очередь, могут получать оценки качества, связанные с возможностями поставщика, неравномерностью поставок, требованиями регулирующих органов. Целесообразно в этих случаях включать в модель и эти критерии отбора вариантов. Таким образом, возникает многокритериальная задача создания плана реализации проекта. Задача в общем виде не имеет решения, не существует такого плана реализации проекта, который удовлетворял бы всем перечисленным критериям. Однако теория и практика решения подобных задач имеет методологические подходы, которые обеспечивают выбор допустимых вариантов [14]. Далее мы рассмотрим основные из них. Эти методы относительно просты в использовании (например, метод Саати), и позволяют получать довольно эффективные решения.

В нижеприведенные методы мы сознательно не включили различные способы свертки критериев (мультипликативные, аддитивные, смешанные), т.к. трудно и, зачастую, практически невозможно их нормализовать (то есть обеспечить одинаковую размерность и важность). Нормирующие весовые коэффициенты в данной задаче определяются весьма субъективно.

#### *Оптимизация по Парето*

Пусть имеется задача с  $k$  критериями  $F_1, F_2, \dots, F_k$ . И пусть во множестве возможных решений существуют два варианта решений  $p_1, p_2$ , у которых значения критериев  $F_1, F_2, \dots, F_k$  для варианта  $p_1$  лучше значений этих же критериев для варианта  $p_2$ . Тогда решение  $p_2$  из множества вариантов  $P(K, T)$  вытесняется («доминируется») решением  $p_1$ .

Такая процедура отбрасывания заведомо не лучших решений сохраняет во множестве  $P(K, T)$  только *эффективные* («по Парето» или «паретовские») решения. Они характеризуются тем, что не существуют доминирующие решения ни для одного из них. Совокупность эффективных по Парето решений существенно меньше множества  $P(K, T)$ , его легче анализировать. Окончательный же *выбор решения* по-прежнему является прерогативой человека. Непревзойденное умение решать неформальные задачи присуще только человеку, он способен принимать компромиссные решения, не строго-оптимальные, но вполне *приемлемые* по ряду критериев, он может взять ответственность на себя за окончательный выбор решения.

Но данная процедура выбора, повторенная неоднократно, может служить основой для разработки некоторых формальных правил, которые могут применяться без участия человека. Это так называемые «эвристические» методы выбора решений.

Очень полезным в некоторых случаях оказывается *диалоговый интерактивный* режим выбора решения [9]. В этом случае компьютер выводит на экран последовательно вопросы о допустимых интервалах значений управляемых параметров проекта и возможные варианты ответов, а заказ-

чик при этом выбирает один из них. Задаваемые вопросы и варианты ответов на них выбираются заказчиком из базы знаний системы по ответам на предыдущий вопрос. В результате такого диалога формируется вариант плана проекта, а также набор рекомендуемых мероприятий.

*С помощью интерактивного режима* пользователь осуществляет следующие действия:

- выбирает вариант задачи оптимизации, используя совокупность критериев оптимальности, заданную пользователем, и соответствующие наборы переменных;
- выбирает варианты расчета;
- выбирает метод оптимизации из библиотеки и задает его параметры;
- выбирает и задает параметры метода оптимизации;
- выбирает варианты оформления результатов моделирования и промежуточных результатов оптимизации.

*Диалоговый интерактивный режим взаимодействия* при выборе решения трудно переоценить. Непосредственный диалог заказчика и компьютера часто необходим, потому как реальные задачи зачастую при выборе необходимых параметров включают в себя неформализуемые этапы, которые требуют участия человека, принятия им соответствующих решений. Помимо этого, оперативная связь с компьютером дает возможность за короткое время просмотреть множество вариантов решений и выбрать оптимальный, ускоряет процесс поиска информации и создает условия эффективного ее использования.

#### *Метод последовательных уступок*

Расположим критерии  $F_1, F_2, \dots$  по убыванию важности. Ищем сначала решение, которое обращает в экстремум первый критерий  $F_1 = F_1^*$ . Затем назначаем некоторую «уступку»  $\Delta F_1$ , которую мы можем сделать, изменив экстремальное значение  $F_1^*$  на величину уступки, чтобы добиться экстремума критерия  $F_2$ . Значение уступки определяется из практических соображений, учитывая известную нам точность входных данных. Критерий  $F_1$  переводится в ограничение (с учетом уступки), после чего ищется решение, обращающее в экстремум критерий  $F_2$ . Далее назначается «уступка»  $\Delta F_2$ , цена которой может обеспечить экстремум критерия  $F_3$ , и т.д. Этот метод построения компромиссного решения наглядно показывает, значение какой «уступки» в одной критерии дает выигрыш в другом, и какая цена выигрыша.

Данная многокритериальная математическая модель функционирования заказчика содержит критерии, которые могут быть по-разному ранжированы, но нам представляется наиболее целесообразной следующая приоритетность:

$F_1 = F(K, T)$  – зависимость качества проекта от размеров финансирования проекта (вектор  $K$ ) и от сроков реализации проекта и отдельных пусковых комплексов (вектор  $T$ );

- $F_2 = \text{ФОК}$  – значение из 3.2.2 степени изменения конфигурации;
- $F_3 = G$  – суммарные взвешенные отклонения от плана финансирования проекта из 3.2.3;
- $F_4$  – величина качества плана поставок (оценку вариантов Заказчик должен производить совместно с Поставщиком);
- $F_5$  – величина качества плана налогообложения (оценку вариантов Заказчик должен производить вместе с органами государственного регулирования).

### *Метод иерархий*

Предложенный Т. Саати в 1974 году [17] метод анализа иерархий также является многокритериальным методом принятия решений. Преимущество этого метода заключается в простоте экспертного исследования, которое предполагает декомпозицию исследуемой проблемы на простые составляющие части. Результатом такой процедуры является относительная значимость анализируемых альтернатив для всех находящихся в иерархии критериев, которая выражается численно векторами приоритетов.

В вершине иерархии располагается цель, промежуточные уровни содержат критерии, альтернативы расположены на нижнем уровне.

Относительная важность элементов иерархии  $a_{ij}$  устанавливается с использованием шкалы отношений (табл. 3.2.1), которая позволяет численно оценить методом попарного сравнения степень предпочтения сравниваемых объектов друг перед другом.

В результате строится набор матриц парных сравнений, каждая из которых имеет вид:

$A = \{a_{ij}\}$ , где  $n$  – порядок матрицы парных сравнений.

По каждой матрице парных сравнений вычисляются вектора приоритетов ( $W^E$ ) по следующему правилу:

сначала производится нормализация матрицы  $A$  путем деления каждого ее элемента на сумму элементов соответствующего столбца. Затем компоненты вектора  $W^E$  определяются в виде средних арифметических значений элементов соответствующей строки нормализованной матрицы.

По каждой матрице сравнений находим:

– *максимальное значение*  $\lambda_{max}$  по следующей формуле:

$$\lambda_{max} = e^T [A] W^E,$$

(матрица  $A$  умножается справа на вектор  $W^E$ , после чего складываются все компоненты сформированного вектора);

– *индекс согласованности* по формуле:

$$ИС = (\lambda_{max} - n)/(n-1);$$

– *отношение согласованности* по формуле:

$$ОС = ИС/СС,$$

где  $CC$  – матожидание индекса согласованности составленной случайным образом матрицы парных сравнений.  $CC$  приближенно вычисляется по формуле:

$$CC = \frac{1.98(n-2)}{n}.$$

Таблица 3.2.1

Шкала отношений

<i>Степень предпочтения <math>a_{ij}</math></i>	<i>Определение</i>	<i>Разъяснение</i>
1	Одинаковая значимость	Две альтернативы обеспечивают одинаковый вклад в результат
3	Некоторое преобладание предпочтения одной альтернативы над другими (слабая значимость)	Имеется некоторое предпочтение одной из альтернатив, но недостаточно убедительное
5	Существенное или сильное предпочтение	Имеются надежные суждения предпочтительности одной из альтернатив
7	Очень сильное предпочтение	Существуют убедительные свидетельства в пользу одной альтернативы перед другой
9	Абсолютное предпочтение	Установлена абсолютная степень предпочтительности
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между двумя смежными альтернативами	В ситуациях, когда требуется компромиссное суждение
$a_{ji} = 1/a_{ij}$	Альтернатива $j$ при сравнении с $i$ получает обратное значение предпочтения	Сопоставляя в обратном порядке две альтернативы, значение $a_{ji}$ приобретает обратную величину $1/a_{ij}$

Приемлемая величина отношения согласованности должна быть  $OS \leq 0.1$  (в редких случаях до 0.15). В противном случае необходимо перепроверить предоставленные экспертные суждения.

*Пример.* Из трех вариантов проекта необходимо выбрать лучший по 4-м критериям: степень качества, уровень изменения конфигурации, уровень отклонения от плана финансирования и величина затрат. Трехуровневая структура альтернатив и критериев представлена на рис. 3.2.1.

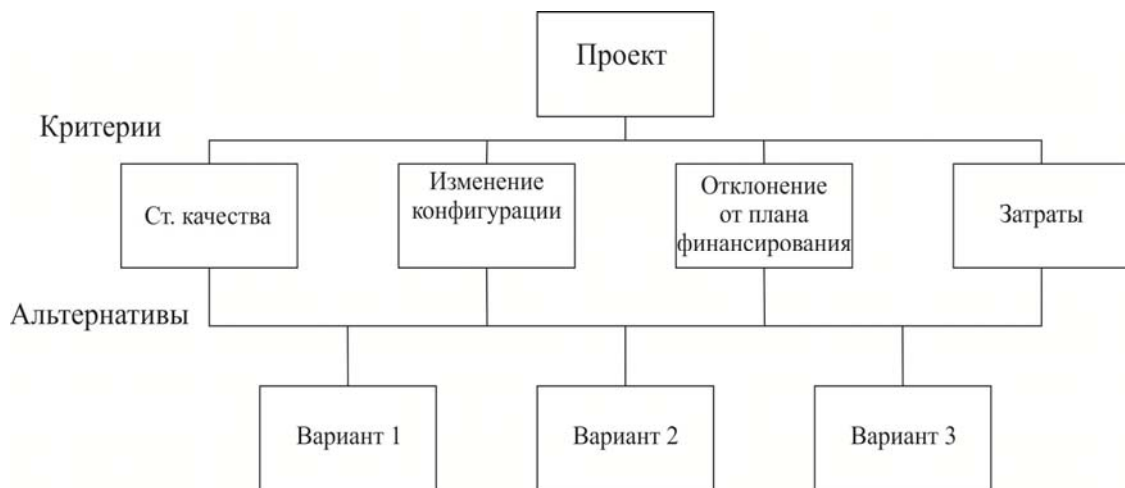


Рис. 3.2.1. Структура альтернатив и критериев при выборе проекта

Сначала строится матрица попарных сравнений критериев, затем формируется вектор приоритетов критериев.

Матрица парных сравнений А. Уровень 2

Проект	Степень качества	Уровень изменения конфигурации	Отклонение от плана финансирования	Затраты
Качество	1	3	2	1/3
Изменение конфигурации	1/3	1	1/2	1/4
Отклонение от плана финансирования	1/2	2	1	1/6
Затраты	3	4	6	1

Теперь вычислим  $\lambda_{max}$ .

Для этого нормализуем матрицу:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 1/4 \\ 1/2 & 2 & 1 & 1/6 \\ 3 & 4 & 6 & 1 \end{pmatrix} \quad N_A = \begin{pmatrix} 0,21 & 0,30 & 0,21 & 0,19 \\ 0,07 & 0,10 & 0,05 & 0,14 \\ 0,10 & 0,20 & 0,11 & 0,1 \\ 0,62 & 0,40 & 0,63 & 0,57 \end{pmatrix}$$

$$w_{\text{качество}} = (0,21 + 0,30 + 0,21 + 0,19) / 4 = 0,2675$$

$$w_{\text{изм.конф}} = (0,07 + 0,10 + 0,05 + 0,14) / 4 = 0,0900$$

$$w_{\text{откл.плана}} = (0,10 + 0,20 + 0,11 + 0,1) / 4 = 0,1275$$

$$w_{\text{затраты}} = (0,62 + 0,40 + 0,63 + 0,57) / 4 = 0,69$$

Исследуем матрицу на согласованность.

$$\bar{w}_1 = 0,2675 \quad \bar{w}_2 = 0,09 \quad \bar{w}_3 = 0,1275 \quad \bar{w}_4 = 0,69$$

$$A_{\bar{w}} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 0,33 \\ 0,33 & 1 & 0,33 & 0,25 \\ 0,5 & 3 & 1 & 0,17 \\ 3 & 4 & 6 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,2675 \\ 0,09 \\ 0,1275 \\ 0,69 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,0225 \\ 0,3942 \\ 0,6462 \\ 2,6175 \end{pmatrix}$$

Отсюда получаем:

$$\lambda_{\max} = 1,0225 + 0,3942 + 0,6462 + 2,6175 = 4,6804.$$

$$\text{Индекс согласованности: } \text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,68 - 4}{4 - 1} = 0,227.$$

Оценка согласованности:

$$\text{СС} = \frac{1,98(4-2)}{4} = 0,99,$$

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СС}} = \frac{0,227}{0,99} = 0,29.$$

ОС  $\leq 0,3$  уровень согласованности матрицы А является не идеальным, но приемлемым.

Затем для каждого критерия строим матрицы попарных сравнений вариантов и формируем вектора приоритетов.

Матрица парных сравнений S. Уровень 3

Качество	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Вариант 1	1	5	3
Вариант 2	1/5	1	1/2
Вариант 3	1/3	2	1

Нормализуем матрицу S:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad N_S = \begin{pmatrix} 0,65 & 0,625 & 0,67 \\ 0,13 & 0,125 & 0,11 \\ 0,22 & 0,25 & 0,22 \end{pmatrix}$$

$$w_{Burton} = (0,65 + 0,625 + 0,67) / 3 = 0,648$$

$$w_{Thirty-Two} = (0,13 + 0,125 + 0,11) / 3 = 0,121$$

$$w_{Salomon} = (0,22 + 0,25 + 0,22) / 3 = 0,23$$

Исследуем согласованность матрицы:

$$\bar{w}_1 = 0,648 \quad \bar{w}_2 = 0,121 \quad \bar{w}_3 = 0,23$$



$$S_{\bar{w}} = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 0,2 & 1 & 0,5 \\ 0,33 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,648 \\ 0,121 \\ 0,23 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,943 \\ 0,3656 \\ 0,6858 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = 1,943 + 0,3656 + 0,6858 = 2,9944 \sim 3$$

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{3-3}{2} = 0$$

$$СС = \frac{1,98(3-2)}{3} = 0,66$$

$$ОС = \frac{ИС}{СС} = 0.$$

### Матрица парных сравнений J. Уровень 3

Изменение конфигурации	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Вариант 1	1	4	8
Вариант 2	1/4	1	6
Вариант 3	1/8	1/6	1

$$J = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 8 \\ 0,25 & 1 & 6 \\ 0,125 & 0,17 & 1 \end{pmatrix} N_J = \begin{pmatrix} 0,72 & 0,77 & 0,53 \\ 0,18 & 0,19 & 0,4 \\ 0,1 & 0,03 & 0,07 \end{pmatrix}$$

$$w_{Burton} = (0,72 + 0,77 + 0,53) / 3 = 0,67$$

$$w_{Thirty-Two} = (0,18 + 0,19 + 0,4) / 3 = 0,25$$

$$w_{Salomon} = (0,1 + 0,03 + 0,07) / 3 = 0,03$$

$$\bar{w}_1 = 0,67 \bar{w}_2 = 0,25 \bar{w}_3 = 0,03$$

$$J_{\bar{w}} = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 8 \\ 0,25 & 1 & 6 \\ 0,125 & 0,17 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,67 \\ 0,25 \\ 0,03 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,910 \\ 0,5975 \\ 0,1565 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = 1,910 + 0,5975 + 0,1565 = 2,6637$$

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{2,67-3}{2} = -0,165$$

$$ОС = \frac{ИС}{СС} = \frac{-0,165}{0,66} = -0,25.$$

### Матрица парных сравнений Na. Уровень 3

Отклонение от плана финансирования	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Вариант 1	1	6	1/3
Вариант 2	1/6	1	1/4
Вариант 3	3	4	1

$$N_a = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 0,33 \\ 0,17 & 1 & 0,25 \\ 3 & 4 & 1 \end{pmatrix} N_{Na} = \begin{pmatrix} 0,24 & 0,54 & 0,21 \\ 0,04 & 0,09 & 0,15 \\ 0,72 & 0,4 & 0,63 \end{pmatrix}$$

$$w_{Burton} = (0,24 + 0,54 + 0,21) / 3 = 0,33$$

$$w_{Thirty-Two} = (0,04 + 0,08 + 0,15) / 3 = 0,09$$

$$w_{Salomon} = (0,72 + 0,4 + 0,63) / 3 = 0,4375$$

$$\bar{w}_1 = 0,33 \quad \bar{w}_2 = 0,09 \quad \bar{w}_3 = 0,4375$$

$$N_a \bar{w} = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 0,33 \\ 0,17 & 1 & 0,25 \\ 3 & 4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,33 \\ 0,09 \\ 0,44 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,0152 \\ 0,2561 \\ 1,79 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = 1,0152 + 0,2561 + 1,79 = 3,0613$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3,0613 - 3}{2} = 0,03$$

$$OC = \frac{IC}{CC} = \frac{0,03}{0,66} = 0,05$$

### Матрица парных сравнений V. Уровень 3

Затраты	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Вариант 1	1	4	7
Вариант 2	1/4	1	5
Вариант 3	1/7	1/5	1

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 0,25 & 1 & 5 \\ 0,14 & 0,2 & 1 \end{pmatrix} N_V = \begin{pmatrix} 0,72 & 0,76 & 0,54 \\ 0,18 & 0,19 & 0,39 \\ 0,1 & 0,04 & 0,08 \end{pmatrix}$$

$$w_{Burton} = (0,72 + 0,76 + 0,54) / 3 = 0,67$$

$$w_{Thirty-Two} = (0,18 + 0,19 + 0,39) / 3 = 0,25$$

$$w_{Salomon} = (0,1 + 0,04 + 0,08) / 3 = 0,07$$

$$\bar{w}_1 = 0,67 \quad \bar{w}_2 = 0,25 \quad \bar{w}_3 = 0,07$$

$$V \bar{w} = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 0,25 & 1 & 5 \\ 0,14 & 0,2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,67 \\ 0,25 \\ 0,07 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,16 \\ 0,7576 \\ 0,2138 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = 2,16 + 0,7576 + 0,2138 = 3,1314$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3,1314 - 3}{2} = 0,065$$

$$OC = \frac{IC}{CC} = \frac{0,065}{0,66} = 0,09$$

Полученные вектора приоритетов для каждого критерия занесем в таблицу. Искомый вектор приоритетов получается умножением матрицы приоритетов вариантов на строку приоритетов критериев.

Проект	Качество	Изменение конфигурации	Отклонение от плана финансирования	Затраты	Результирующий вектор
	0,2675	0,09	0,1275	0,69	
Вариант 1	0.648	0.67	0.33	0.67	0,738
Вариант 2	0.121	0.25	0.09	0.25	0,2388
Вариант 3	0,23	0,03	0.4375	0.07	0,1683

Вариант 1:

$$0,2675 \times 0,648 + 0,09 \times 0,67 + 0,1275 \times 0,33 + 0,69 \times 0,67 = 0,738,$$

вариант 2:

$$0,2675 \times 0,121 + 0,09 \times 0,25 + 0,1275 \times 0,09 + 0,69 \times 0,25 = 0,2388,$$

вариант 3:

$$0,2675 \times 0,23 + 0,09 \times 0,03 + 0,1275 \times 0,4375 + 0,69 \times 0,07 = 0,1683.$$

При выборе проекта следует отдать предпочтение варианту 1. Если в процессе вычислений обнаруживается несогласованность оценок экспертов по альтернативам или критериям, то следует перепроверить предоставленные оценки и повторно произвести расчеты.

Выше приведенные модели позволяют провести анализ степени заинтересованности заказчика – участника проекта: определить его интересы, ценности, роль, ответственность и место в проектной деятельности; узнать порядок распределения между заказчиком и другими стейкхолдерами денег, власти и других ресурсов.

Сформулирована и поставлена в явном виде задача управления конфигурацией продукта и проекта. Вышеприведенные модели реализуют большинство компетенций Заказчика проекта. Эти модели могут служить методологической базой при разработке программных комплексов, входящих в состав автоматизированной системы управления при решении заказчиком выше представленных задач проектного управления на всех стадиях реализации.

### Глава 3.3. Модели и механизмы управления проектами для генпоставщика

В данной главе описываются математические модели, необходимые для использования при управлении проектом на всех его стадиях с участием стейкхолдера – генпоставщика. Каждый предлагаемый вариант плана поставок рассматривается с учетом специфических условий, которым адекватна модель, при этом анализируются различные методы решения поставленных задач. Использование данных моделей позволяет повысить эффективность деятельности генпоставщика, обеспечивает достижение поставленных целей и выполнение соответствующих ему компетенций при разных условиях осуществления проекта.

*Генпоставщик* – организация, управляющая процессом обеспечения закупок и поставок по контрактам с разными поставщиками.

Генпоставщик осуществляет согласованный, систематический и упорядоченный процесс управления поставками необходимого оборудования и материалов для осуществления проекта, который обеспечивает выполнение проекта в плановые сроки с заданным качеством, и, по возможности, позволяет снизить общие затраты на товары и услуги, закупаемые материалы при сохранении (или повышении) их качества.

В системе управления генпоставщиком решаются следующие задачи:

- анализ потребностей работ проекта в материалах и необходимом оборудовании;
- выбор оптимальных вариантов поставок (оценка квалификации поставщиков, проведение тендеров и аукционов);
- заключение контрактов с поставщиками и контроль их исполнения;
- организация централизованного снабжения необходимыми материалами и оборудованием всего проекта с учетом общих затрат на обеспечение поставок;
- осуществление стратегического и тактического анализа взаимоотношений с поставщиками.

Деятельность генпоставщика реализует следующие возможности:

- снижение расходов на закупку необходимых материалов и оборудования в результате консолидации потребностей разных работ проекта, оптимизации цен за счет тендеров и аукционов, сокращения разовых закупок;
- сокращение времени оформления закупок за счет автоматизации операций взаимодействия с отдельными поставщиками;
- оптимизация поставок, повышение качества обеспечения проекта всем необходимым.

Специфические характеристики и параметры управления проектами со стороны генпоставщика приведены в таблице 3.3.1 (строка 4).

### *Процесс управления поставками*

Управление поставками является одной из важнейших задач в управлении проектом. Возможность снижения расходов при обеспечении проекта ресурсами может существенно повысить его рентабельность. Кроме того, для обеспечения надлежащего качества поставляемых ресурсов, необходимо выбирать квалифицированных поставщиков, устанавливать с ними устойчивые и взаимовыгодные партнерские отношения. Эффективное управление процессами поставок позволяет уменьшать риски поставок. Система управления со стороны генпоставщика должна обеспечить оптимизацию деятельности, связанной с поставками ресурсов при выполнении проекта. Кроме того, должны быть учтены и прямые, безальтернативные поставки, где отсутствует проблема выбора.

При привлечении генпоставщика на ранних этапах разработки проекта затраты могут быть сокращены до 18%. Проведенные исследования показали [9], что интеграция процессов реализации проекта с привлечением сторонних ресурсов может привести к сокращению складских запасов не менее 30% и увеличить своевременность поставок до 73%.

В процессе выбора поставщика выполняются следующие этапы:

#### 1. Определение требований к поставщику и их ранжирование.

Для разных проектов требования могут обладать своей спецификой, но, прежде всего, это достижение оптимального соотношения цена/качество, своевременность поставок, степень ответственности поставщика (своевременная замена брака, соблюдение требований к качеству и пр.).

2. Анализ характеристик потенциальных поставщиков, к которым относятся следующие: производственные возможности; финансовое состояние, стабильность; технологические возможности; организационная форма и размер предприятия; права интеллектуальной собственности; право собственности; управленческая зрелость, в том числе управление проектами; отзывы.

#### 3. Формирование «длинного списка» поставщиков.

Данный этап заключается в определении всех потенциальных поставщиков, которые соответствуют предъявленным требованиям (использование рекламных журналов, Интернет, рекомендаций других организаций и т.п.)

#### 4. Формирование «короткого списка» поставщиков.

Формировать «короткий список» поставщиков можно несколькими способами:

– отбирать поставщиков по базе использования интегрированного показателя качества продукции, зависящего от объемов поставок (см. ниже модель 3.3.3);

– проводить качественный экспертный отбор возможных поставщиков, используя критерии корреляции Кэндалла и Спирмена (модель 3.3.4);

– проводить качественный экспертный отбор возможных поставщиков, используя принципы попарного сравнения (см. ниже модель 3.4.5).

Предлагаемые модели 3.3.3–3.3.5 можно использовать по отдельности и в их сочетании друг с другом.

#### 5. Оценка отобранных по «короткому списку» поставщиков.

На этом этапе сопоставляются возможности поставщиков с требованиями к ним и соответствующими приоритетами требований. При сопоставлении формируются численные оценки, показывающие степень соответствия претендента каждому качественному требованию. Сформированные оценки используются на следующем этапе для построения моделей формирования календарного плана поставок материалов и оборудования.

#### 6. Выбор поставщика.

Этот этап заключается в анализе всех отобранных поставщиков, окончательный выбор поставщика и заключение контракта.

В настоящее время процедура выбора поставщика осуществляется не формализовано, как правило, создается отборочный комитет, анализирующий собранную информацию и осуществляющий выбор, используя одну из методик. Чаще всего используется позиционная система, в основе которой лежат экспертные оценки поставщиков по сформированным критериям и полученным характеристикам.

Позиционная система (модель количественной оценки) достаточно объективна, она гарантирует использование всеми членами отборочного комитета одинаковых критериев. Она эффективна при небольшой номенклатуре поставок и малом количестве поставщиков. Значительное количество поставщиков и большая номенклатура поставляемых продуктов, различных вариантов приобретения оборудования делает этот подход затруднительным, не способствующим достижению оптимального решения. Проекты на современном этапе как раз характеризуются большой информационной емкостью.

Приведенные ниже математические модели управления со стороны генпоставщика (модели 3.3.6–3.3.8) обеспечивают выбор наиболее эффективных поставщиков, формируя при этом оптимальный план поставок. При безальтернативных поставках процесс описывается графиком Ганта или простым сетевым графиком как подпроект в основном проекте. Время окончания подпроекта – это расчетная дата поставки по основному графику (веха или ограничение по времени). Рассчитав продолжительность подпроекта, находим дату, когда надо начать поставку, чтобы она реализовалась вовремя в нужном объеме и в нужном месте.

Используя данные модели, можно решать описанные выше задачи поставщика применительно к проектам любого масштаба и степени сложности, при этом создается возможность автоматизации этих процессов.

*Математическая модель выбора поставщика по критерию качества  
продукта, зависящего от объемов поставок*

Пусть параметр  $Y$  характеризует качество поставляемого продукта. Практика показывает, что продукция различных поставщиков различается по качеству в зависимости от объемов поставок от поставщика  $X_i$ . Рассмотрим модель для выявления характера этой зависимости качества от объемов поставок каждого поставщика.

Исходными данными модели являются помесичные ряды объемов поставок  $i$ -го поставщика  $\{x_{it}\}$  и значения показателя качества  $\{y_t\}$  ( $i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T$ ).

Построим регрессионную линейную (аддитивную) модель зависимости параметра качества от объемов поставок в виде:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 * X_1 + \dots + \alpha_n * X_n, \quad (3.3.1)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент регрессии, показывающий степень влияния объема поставки поставщика  $i$  на значение параметра качества  $Y$ . В случае изменения объема поставки на единицу измерения исходных данных показатель качества изменяется на величину коэффициента регрессии.

При построении модели определяем оптимальное множество поставщиков. Обоснованность отбора поставщиков проверяется посредством расчета для каждой пары  $X_i, X_j$  коэффициентов корреляции  $r_{ij}$  в уравнении (3.3.1). Если коэффициент корреляции близок к 1 ( $|r_{ij}| \geq 0.8$ ), то одного из поставщиков необходимо исключить из множества. Исключается тот, который имеет больше нареканий по срокам поставки, качеству продукции и пр. При равных условиях исключается произвольный из них. Следует исключить также поставщиков, которые имеют малую величину степени влияния на параметр качества  $Y$ . Решение об исключении поставщика принимается ответственным лицом по каждому поставщику индивидуально, анализируя полученные коэффициенты регрессии. В результате получаем неизбыточное множество поставщиков, имеющих значительное влияние на исследуемый параметр качества  $Y$ .

Рекомендуем также строить нелинейную (мультипликативную) модель зависимости параметра качества от объемов поставок в виде:

$$Y = \alpha_0 x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} * \dots * x_n^{\alpha_n}. \quad (3.3.2)$$

Полученные здесь показатели степени  $\alpha_i$  – коэффициенты эластичности, показывающие, на сколько процентов изменится показатель  $Y$ , если изменится  $i$ -я переменная на 1%. В [19] показано и обратное – если коэффициенты эластичности постоянны, то показатель качества и объемы поставок связаны уравнением (3.3.2). Мы получаем, таким образом, правило выбора между формулой (3.3.1) или (3.3.2). Проанализировав фактические данные о поставках в прошлые периоды, и вычислив соответствующие коэффициенты эластичности при разных значениях объемов, смотрим их ва-

риабельность. Если вариабельность близка к нулю, выбираем модель (3.3.2), в противном случае (3.3.1).

Практическое использование данных моделей показывает, что характер влияния объема поставок на показатель их качества чаще всего отрицательный. Этим фактом определяется следующая тактика отбора поставщиков: или исключаем крупных поставщиков, имеющих больший (по модулю) отрицательный коэффициент регрессии или эластичности (неся при этом финансовые потери из-за разницы в ценах на мелкий и крупный опт), или вводим усиленный контроль качества больших поставок, что тоже сопряжено с дополнительными затратами. Сравнивая эти затраты с затратами на проведение контроля больших поставок, выбираем приемлемое решение.

*Экспертный отбор поставщиков по критериям корреляции  
Кэндалла и Спирмена*

Пусть имеются  $n$  потенциальных поставщиков, которых эксперты проранжировали, приписав им ранги 1, 2, ...,  $n$  в соответствии с индивидуальным представлением. Ранжирование может осуществляться как по отдельным критериям (модель 3.3.5), так и по их совокупности. Согласованность результатов ранжирования экспертов оценивается коэффициентом ранговой корреляции  $R$ , предложенным Спирменом. Пусть  $\{x_p\}$  и  $\{y_p\}$  ранги, которые установили два эксперта для поставщика  $p$ , тогда коэффициент корреляции  $R$  определяется формулой

$$R = 1 - \frac{6 \sum d_p^2}{n^3 - n}, \quad (3.3.3)$$

где  $n$  – число проранжированных поставщиков,  $d_p = x_p - y_p$  – разность рангов, проставленных поставщикам двумя экспертами.

Максимальное значение степени согласованности экспертов +1 (соответствует полному совпадению рангов обоих экспертов), а минимальное значение –1 (соответствует противоположным мнениям экспертов).

При большом числе ранжируемых поставщиков процесс ранжирования затруднителен, поэтому в таблице критических значений содержится только 30 признаков. Если сравнивается большее число переменных, то используется таблица критических значений пирсоновского коэффициента корреляции при  $k = n$ .

Пример. Пусть эксперты провели ранжирование 11 поставщиков по некоторым критериям.

№ поставщика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 эксперт	2	5	8	1	4	6	9	1	8	5	10
2 эксперт	3	7	6	3	4	11	11	2	10	7	9
$d_p$	-1	-2	2	-2	0	-5	-2	-1	-2	-2	1
$d_p^2$	1	4	4	4	0	25	4	1	4	4	1



Подставляя данные в формулу (3.3.3) и произведя расчет, получаем:

$$R = 1 - \frac{6 \times 52}{11(11 \times 11 - 1)} = 0.76.$$

Уровень значимости определяем по таблице [21], которая содержит критические значения коэффициентов ранговой корреляции.

В этой таблице значения коэффициентов корреляции приводятся по абсолютной величине. Знак коэффициента корреляции необходимо учитывать только при интерпретации.

Находим уровень значимости в таблице по числу поставщиков  $n$ . В нашем примере  $n = 11$ . Находим  $r_{кр}$ :

для  $P \leq 0,05$   $r_{кр} = 0,52$ ; для  $P \leq 0,01$   $r_{кр} = 0,74$ .

Полученный в примере коэффициент корреляции показывает уровень значимости 1%. В данном случае получили очень хорошо согласованные мнения экспертов.

#### *Случай равных рангов*

Эксперт не всегда может провести четкую грань между двумя разными объектами оценивания. Тогда вводят «связанные ранги», таким объектам оценивания, присписывается один номер. Например, если эксперт не может разграничить по значимости 3-го и 4-го поставщика, то им присваивается один дробный ранг 3,5. В случае одинаковых рангов (их может быть несколько у каждого эксперта) формула для вычисления коэффициента корреляции Спирмена несколько меняется. В нее добавляются новые члены, которые учитывают одинаковые ранги. Эти поправки добавляются в числитель формулы:

$$D_j = (k_j^3 - k_j)/12,$$

где  $k_j$  – число одинаковых рангов в  $j$ -й группе.

Коэффициент корреляции Спирмена с поправками вычисляется по следующей формуле:

$$R = 1 - \frac{6 \sum_p d_p^2 + \sum_j D_j}{n^3 - n}. \quad (3.3.4)$$

Пример:

№ поставщика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Эксперт 1	5	7	7	5	9	6	2,5	2,5	1	8	11	9
Эксперт 2	6	8	4	11	3	12	11	11	10	3	3	1
$d_p$	-1	-1	3	-6	6	-6	-8.5	-8.5	-9	5	8	8
$d_p^2$	1	1	9	36	36	36	77.25	77.25	81	25	64	64

В этом примере у 1-го эксперта в одной группе имеется 2 одинаковых ранга (2, 5), поэтому величина поправки будет

$$D_1 = \frac{2^3 - 2}{12} = 0.5.$$

У 2-го эксперта имеется две группы по 3 одинаковых ранга (11 и 3), поэтому величина поправки будет:  $D_2 + D_3 = \frac{(3^3 - 3) + (3^3 - 3)}{12} = 4$ .

Пересчитаем ранговый коэффициент по формуле (3.3.4) с учетом добавок. Получим:

$$R = 1 - \frac{6 \times 471.5 + 0.5 + 4}{12 \times 143} = -0.651.$$

Без учета добавки:

$$R = 1 - \frac{6 \times 471.5}{12 \times 143} = -0.648.$$

Получили незначительные различия. По таблице [20] находим критические значения  $r_{кр}$  для  $n = 12$ :

$r_{кр} = 0,50$  для  $P \leq 0,05$ ,  $r_{кр} = 0,70$  для  $P \leq 0,01$ .

В данном случае получили погрешность согласованности экспертных оценок поставщиков более 1%, но менее 5%. При этом мы получили диаметрально противоположные мнения экспертов. Чем выше оценка одного эксперта, тем ниже у второго. Подобная антисогласованность свидетельствует о некомпетентности одного или обоих экспертов, или о преднамеренности его (их) действий.

В некоторых системах экспертного оценивания используется коэффициент корреляции Кендалла, который вычисляется по формуле:

$$k = \frac{s^+ - s^-}{0.5n(n-1)}. \quad (3.3.5)$$

$s^+$  и  $s^-$  вычисляются путем сравнения рангов всех разных пар поставщиков по двум экспертам. Добавляется 1 к  $s^+$ , если ранги имеют одинаковую последовательность, и к  $s^-$ , если обратную. Имеем всего пар  $s^+ + s^-$ .

Из формулы (3.3.5) следует, что  $k$  представляет собой разность между долей пар поставщиков с совпадающим порядком по обоим экспертам и долей пар поставщиков с несовпадающим порядком (по отношению к количеству всех пар). Например, при значении коэффициента Кэндалла  $k = 0,60$  имеем  $s^+ + s^- = 1$ ,  $s^+ - s^- = 0,60$ , откуда  $s^+ = 0,8$  и  $s^- = 0,2$ , т.е. у 80% пар порядок рангов совпадает и у 20% не совпадают порядки по обоим экспертам. Расчет коэффициента  $k$  для  $n > 10$  оказывается весьма громоздким, кроме того, его числовое значение всегда  $R$ , т.е. коэффициент Спирмена сильнее показывает несогласие ранжировок, поэтому предлагается коэффициент Спирмена использовать для определения согласованности экспертов.

Большой интерес на практике наряду с коэффициентами ранговой корреляции, которые характеризуют согласованность мнений пар экспер-

тов, представляет коэффициент конкордации, который определяет согласованность мнений всей группы экспертов.

Разберем это понятие на примере (табл. 3.3.1). В ней проставлены ранги для оценки  $n$  поставщиков  $m$  экспертами. В нижней строке суммируются ранги экспертов по каждому поставщику  $p$ . Средние значения этих сумм обозначим  $A_p$ . Переставим столбцы по порядку возрастания этих сумм.

$$A_p = \sum_{i=1}^m a_{ip} / m. \quad (3.3.6)$$

Таблица 3.3.1

Ранги для оценки поставщиков

Эксперты	Ранги поставщиков			
	1	2	...	n
1-й	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1n}$
2-й	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2n}$
...	...	...	...	...
$m$ -й	$a_{m1}$	$a_{m2}$	...	$a_{mn}$
Сумма	$\sum_{i=1}^m a_{i1}$	$\sum_{i=1}^m a_{i2}$	...	$\sum_{i=1}^m a_{in}$

В случае равенства всех оценок мы по столбцам получили бы суммы:  $m, 2m, \dots, nm$ . В первом столбце был бы поставщик, у которого все ранги равны 1, во 2-ом столбце поставщик с рангом 2 и т.д.

Сумма квадратов отклонений:

$$S = \sum_{p=1}^n \sum_{i=1}^m (a_{ip} - A_p)^2. \quad (3.3.7)$$

Эта величина характеризует степень согласованности всех экспертов. При полной согласованности мнений значение  $S$  будет близко к 0. Коэффициент конкордации определяет степень согласованности оценок группы экспертов следующим образом:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 (n^3 - n)}. \quad (3.3.8)$$

$W$  изменяется от 0 (полная согласованность) до 1 (полная несогласованность во мнениях экспертов).

Работа экспертов по оцениванию поставщиков должна производиться в несколько этапов. Первый этап заключается в определении и анализе парных коэффициентов корреляции Спирмена, в выявлении и исключении из группы коррумпированных и некомпетентных экспертов. Далее по (3.3.8) определяется коэффициент конкордации, осуществляется работа с экспертами (информирование, их отсев и дальнейшие перерасчеты). Они про-

должаются до получения значения  $W \leq 0.15$ , что обуславливает высокую степень согласованности мнений экспертов. Вычисленные по формуле (3.3.6) значения  $A_p$  будут являться в дальнейшем приоритетами поставщиков.

*Отбор поставщиков с использованием экспертного метода попарных сравнений (метод иерархий Саати)*

Критериями выбора поставщика могут выступать: своевременность поставок; производственные и технологические возможности; соотношение цена/качество (учитывая транспортные издержки); финансовое состояние (стабильность, кредитоспособность); ответственность поставщика (своевременная замена брака, сопровождение и пр.).

Таким образом, возникает многокритериальная задача выбора поставщиков, которую можно решать разными методами. Использование для ее решения метода свертки критериев рассмотрено в [1, 2]. Ниже предлагается метод анализа иерархий Саати [17].

Сначала строим матрицу попарных сравнений критериев, затем формируем вектор их приоритетов. Подробно процедура построения матрицы попарных сравнений и ее анализ на согласованность описаны в 3.3.5. Табл. 3.3.2 содержит пример матрицы попарных сравнений критериев некоторого проекта (использованы данные проекта строительства гипермаркета «Фокус», г. Челябинск).

Нормализуем сформированную матрицу  $A$ , деля все ее элементы на сумму элементов соответствующего столбца.

$$N_A = \begin{pmatrix} 0.48 & 0.43 & 0.29 & 0.29 & 0.62 \\ 0.10 & 0.08 & 0.29 & 0.18 & 0.04 \\ 0.16 & 0.03 & 0.10 & 0.29 & 0.07 \\ 0.10 & 0.03 & 0.02 & 0.06 & 0.07 \\ 0.16 & 0.43 & 0.29 & 0.18 & 0.20 \end{pmatrix}$$

Компонент вектора приоритетов критериев  $W^E$  вычисляется как среднее арифметическое элементов каждой строки матрицы  $N_A$ :

$$W^E = (0.422 \quad 0.138 \quad 0.130 \quad 0.056 \quad 0.252). \quad (3.3.9)$$

Самым приоритетным в данном случае оказался критерий «своевременность поставок» (0, 422), вторым – «производственные и технологические возможности» (0, 252), на третьем-четвертом местах «ответственность поставщика», «соотношение цена/качество», и последнее место заняло «финансовое состояние поставщика».

Таблица 3.3.2

Матрица попарных сравнений критериев

Критерии	Своевременность поставок	Ответственность поставщика	Соотношение цена/качество	Финансовое состояние	Производ. и технол. возможности
Своевременность поставок	1	5	3	5	3
Ответственность поставщика	1/5	1	3	3	1/5
Соотношение цена/качество	1/3	1/3	1	5	1/3
Финансовое состояние	1/5	1/3	1/5	1	1/3
Производ. и технол. возможности	1/3	5	3	3	1

Нормализуем сформированную матрицу  $A$ , деля все ее элементы на сумму элементов соответствующего столбца.

$$N_A = \begin{pmatrix} 0.48 & 0.43 & 0.29 & 0.29 & 0.62 \\ 0.10 & 0.08 & 0.29 & 0.18 & 0.04 \\ 0.16 & 0.03 & 0.10 & 0.29 & 0.07 \\ 0.10 & 0.03 & 0.02 & 0.06 & 0.07 \\ 0.16 & 0.43 & 0.29 & 0.18 & 0.20 \end{pmatrix}$$

Компонент вектора приоритетов критериев  $W^E$  вычисляется как среднее арифметическое элементов каждой строки матрицы  $N_A$ :

$$W^E = (0.422 \quad 0.138 \quad 0.130 \quad 0.056 \quad 0.252). \quad (3.3.10)$$

Самым приоритетным в данном случае оказался критерий «своевременность поставок» (0, 422), вторым – «производственные и технологические возможности» (0, 252), на третьем-четвертом местах «ответственность поставщика», «соотношение цена/качество», и последнее место заняло «финансовое состояние поставщика».

Для каждого критерия затем строим матрицу попарных сравнений поставщиков, формируя вектора их приоритетов. Сформированные по каждому критерию вектора приоритетов поставщиков умножаем скалярно на

строку приоритетов критериев и получаем в результате набор приоритетов поставщиков.

*Статическая однопродуктовая задача выбора поставщика*

Рассматривается совокупность  $n$  поставщиков, которые могут поставлять некоторый продукт в определенное время. Введем следующие обозначения:

$x_p$  – искомый объем поставки продукта, осуществляемой поставщиком  $p$  в заданный момент времени;

$V^{огр}_p$  – ограничение возможности предприятия-поставщика  $p$ ;

$V$  – потребность проекта в продукте в заданный временной интервал;

$V_{min}$  – минимально необходимый объем продукта, обеспечивающий выполнение проекта в заданном временном интервале;

$V_{max}$  – максимальный объем поставки продукта, гарантирующий отсутствие простоев транспорта, которым доставляется продукт в заданный интервал времени;

$z_p$  – закупочная цена единицы продукта, поставляемого  $p$ -м поставщиком;

$c_p$  – стоимость перевозки единицы продукта, поставляемого  $p$ -м поставщиком;

$k_p$  – показатель качества продукта, поставляемого  $p$ -м поставщиком, (вероятность получения продукта, соответствующего всем требованиям качества, определяется по статистике входных контрольных данных качества поставляемого продукта).

В силу ограниченности бюджета проекта формы расчетов и условия поставок определяются долями возможных закупок в общем объеме:

$Q_1$  – доля поставок с отсрочкой платежа;

$Q_2$  – доля поставок с оплатой по факту поставки;

$Q_3$  – доля поставок с предоплатой.

*Критерии эффективности для оценки решения о выборе поставщика.*

При формировании критерия, соответствующего оценке стоимости закупок, определим сначала суммарные затраты на весь объем закупок в заданный временной интервал по всем поставщикам:

$$SC = \sum_{p=1}^n (z_p + c_p) x_p \quad (3.3.11)$$

и общий объем поставок

$$SV = \sum_{p=1}^n x_p. \quad (3.3.12)$$

Минимальная удельная цена продукта во всем объеме поставок составит:

$$C_{min} = \min_p (z_p + c_p). \quad (3.3.13)$$

Определим среднюю цену закупок:

$$C_{cp} = SC/SV.$$

Первый критерий эффективности определим в виде:

$$K_1 = C_{min} / C_{cp}. \quad (3.3.14)$$

Этот критерий характеризует долю, которую составляет минимально возможная цена закупки в средней цене закупки. Максимальное значение ( $K_1 = 1$ ) этот показатель имеет в случае осуществления всех закупок только у поставщика, имеющего наименьшую стоимость продукции. В других случаях  $K_1 < 1$ , это соответствует менее выгодным закупочным ценам. Таким образом, критерий  $K_1$  подлежит максимизации в целях снижения затрат на закупки.

Второй критерий выбирается для оценки условий поставок и формы расчетов. Самые выгодные условия для потребителя производить закупки при отсрочке платежа, менее выгодными условиями является оплата по факту поставки и еще менее выгодными будут условия закупки с предоплатой. Оценку выгодности закупок, учитывая варианты форм оплаты, можно производить, используя коэффициенты эффективности:

- $E_{on}$  (с отсрочкой платежа);
- $E_{fn}$  (с оплатой по факту поставки);
- $E_{np}$  (с предоплатой).

Формируем комплексный критерий следующего вида:

$$K_2 = (E_{on}SV_{on} + E_{fn}SV_{fn} + E_{np}SV_{np}) / SV, \quad (3.3.15)$$

где  $SV_{on}$  – сумма объемов закупок в заданный временной интервал у поставщиков с отсрочкой платежа;

$SV_{fn}$  – сумма объемов закупок в заданный временной интервал у поставщиков с оплатой по факту поставки;

$SV_{np}$  – сумма объемов закупок в заданный временной интервал у поставщиков с предоплатой.

$K_2$  характеризует долю закупок, произведенных на разных условиях в общем объеме. Максимальное значение он имеет при  $K_2 = E_{on}$ , когда все закупки производятся у поставщиков с отсрочкой платежа. В остальных случаях  $K_2 < E_{on}$ , что показывает менее выгодные условия поставок. Значения вышеуказанных коэффициентов эффективности закупок могут быть получены экспертным путем с учетом ограниченных бюджетных возможностей проекта. Таким образом, для получения эффективного решения с использованием данного критерия необходимо максимизировать  $K_2$ .

Третьим частным критерием возьмем показатель, который характеризует качество поставляемых продуктов. Поскольку их качество представляется через вероятностные величины, найдем математическое ожидание поставки качественных продуктов в общем объеме поставок:

$$MV = \sum_{p=1}^n k_p x_p.$$

Критерий качества  $K_3$  тогда имеет следующий вид:

$$K_3 = MV/SV. \quad (3.3.16)$$

$K_3$  принимает максимальное значение в случае, если все закупки осуществляются у поставщика самых качественных продуктов. В остальных случаях  $K_3$  принимает меньшие значения, что означает поставку менее качественных продуктов, следовательно, необходимо стремиться к максимизации  $K_3$ .

Четвертым частным критерием возьмем отклонение суммы объемов поставок от их необходимого количества:

$$K_4 = |SV - V|. \quad (3.3.17)$$

Данное отклонение может вызвать дополнительные затраты, связанные как с простоями исполнителей из-за дефицита продукта, так и с хранением излишков. Следовательно, этот критерий необходимо минимизировать.

Методы и алгоритмы решения многокритериальных задач довольно подробно описаны [14]. Ранее мы использовали некоторые из них, в частности, метод последовательных уступок. Для решения вышеизложенной задачи его также можно применить, но представляется целесообразным вместе с ним произвести свертку сформированных критериев с заданием весовых коэффициентов. Определять весовые коэффициенты целесообразно методом экспертных оценок, определяя при этом их значения, как прямым счетом, так и с помощью попарных сравнений. Произведя свертку частных критериев  $K_1, K_2, K_3, K_4$ , представим итоговый критерий эффективности в виде:

$$F = g_1 K_1 + g_2 K_2 + g_3 K_3 - g_4 K_4, \quad (3.3.18)$$

где:  $g_1, g_2, g_3, g_4$  – весовые коэффициенты,  $g_i > 0, i = 1, 2, 3, 4$ .

Целевая функция  $F$  и ее весовые коэффициенты отражают интересы Генпоставщика, поставляющего определенный вид продукта в заданный период. При повышенном ценовом интересе (купить дешевле), необходимо увеличивать  $g_1$ , увеличение  $g_2$  придает большое значение условиям поставки, для отражения большего внимания к качеству поставляемого продукта следует увеличивать  $g_3$ , увеличение  $g_4$  повлечет уменьшение фактов срыва поставок.

#### *Математическая модель задачи*

Ограничения, обусловленные возможностями поставщиков и потребностями потребителя:

$$0 \leq x_p \leq V^{op}_p, \quad (3.3.19)$$

$$V_{min} \leq SV \leq V_{max}, \quad (3.3.20)$$

Ограничения, обусловленные бюджетными возможностями потребителя с учетом условий поставок:

$$SV_{np} / SV \leq Q_3, \quad (3.3.21)$$

$$SV_{fn} / SV \leq Q_2, \quad (3.3.22)$$

$$SV_{on} / SV \geq Q_1. \quad (3.3.23)$$

Необходимо найти объемы закупок  $x_p$ , соответствующие ограничениям (3.3.19)–(3.3.23) и доставляющие максимум суммарному критерию эффективности (3.3.18).



Пример. Пусть потребность проекта в определенном виде металла составляет 4200т в месяц. По условиям своевременного выполнения проекта минимальная потребность в металле составляет два вагона (120 т) в сутки.

В связи с ограничениями по разгрузке максимальная суточная поставка металла не может превышать 5 вагонов (300 т).

В табл. 3.3.3 приведены характеристики поставщиков.

Приведенный в табл. 3.3.3 показатель качества есть вероятность получения продукта, соответствующего всем требованиям качества (он определяется по статистическим данным входного контроля качества поставляемого продукта).

Таблица 3.3.3

Перечень и характеристики поставщиков

Поставщики	Стоимость 1т, тыс.руб.	Ограничение поставок, т. в мес.	Ж/д. тариф за 1т. в тыс. руб.	Показатель качества	Условие поставки
Сатка, Челябинская обл.	2, 800	300	200	0, 86	По факту поставки
Челябинский мететалургич. комбинат	2, 770	Без ограничений	220	0, 87	Предоплата
Липецк, «Свободный сокол»	2, 976	Без ограничений	124	0, 89	По факту поставки
Новотроицкий мет. комбинат, Оренбургская обл.	2, 880	1200	237	0, 8	Отсрочка платежа
Нижнетагильский мет. комбинат	3, 120	Без ограничений	249	0, 9	По факту поставки
Екатеринбургский мет. комбинат	3, 250	Без ограничений	199	0, 92	Отсрочка платежа

Магнитогорский металлург. комбинат	3, 780	360	234	0, 97	Отсрочка платежа
Пашня, Пермская обл.	2, 700	300	253	0, 87	Предоплата
Тульский «Чермет»	3, 060	Без ограничений	130	0, 93	Отсрочка платежа
Московский мет. комбинат	3, 200	Без ограничений	125	0, 96	По факту поставки

Исходя из существующих ограничений объемов финансирования, зададим коэффициенты эффективности закупок продукта:

- $E_{np} = 0, 25$  (по условиям предоплаты);
- $E_{fn} = 0, 6$  (по факту поставки);
- $E_{on} = 1$  (при отсрочке платежа).

Доли закупок в объеме поставок:

$$Q_1 = 0, 5;$$

$$Q_2 = 0, 35;$$

$$Q_3 = 0, 15.$$

Зададим весовые коэффициенты критериев эффективности:

$$g_1 = 0, 7; g_2 = 0, 2; g_3 = 0, 1; g_4 = 0, 3.$$

Математическая модель задачи оптимизации плана поставок.

Ограничения имеют следующий вид:

Учитывая среднее количество в месяце рабочих дней – 21,8, имеем  $V_{max} = 21, 8 * 300 = 6540$ ,  $V_{min} = 21, 8 * 120 = 2616$ , откуда

$$2616 \leq SV \leq 6540 ,$$

$$SV = \sum_{p=1}^n x_p.$$

$$x_1 \leq 300,$$

$$x_4 \leq 1200,$$

$$x_7 \leq 360,$$

$$x_8 \leq 300,$$

(3.3.23)

$$\begin{aligned}(x_2 + x_8)/SV &\leq 0,15, \\(x_1 + x_3 + x_5 + x_{10})/SV &\leq 0,35, \\(x_4 + x_6 + x_7 + x_9)/SV &\geq 0,5, \\0 &\leq x_p.\end{aligned}$$

Требуется определить значения  $x_p$ , соответствующие ограничениям (3.3.23) и доставляющие максимум суммарному критерию эффективности:

$$W = 0,7K_1 + 0,2K_2 + 0,1K_3 - 0,3K_4 \rightarrow \max.$$

Найдем

$$\begin{aligned}C_{min} &= \min_p(Z_p, D_p^{mp}) = \min\left(2,8 + \frac{200}{60}, 2,77 + \frac{220}{60}, 2,976 + \frac{124}{60}, \right. \\&\quad \left. 2,88 + \frac{237}{60}, 3,12 + \frac{249}{60}, 3,25 + \frac{199}{60}, 3,78 + \frac{234}{60}, \right. \\&\quad \left. 2,7 + \frac{253}{60}, 3,06 + \frac{130}{60}, 3,2 + \frac{125}{60}\right) = \\&= \min(6,13, 6,44, 5,04, 6,83, 7,27, 6,57, 7,68, 6,92, 5,23, 5,28) = 5,04. \\&= 5,04 * SV / (6,13x_1 + 6,44x_2 + 5,04x_3 + 6,83x_4 + 7,27x_5 + 6,57x_6 + 7,68x_7 + 6,92x_8 + 5,23x_9 + 5,28x_{10}).\end{aligned}$$

$$K_2 = (1*(x_4 + x_6 + x_7 + x_9) + 0,5*(x_1 + x_3 + x_5 + x_{10}) + 0,2*(x_2 + x_8))/SV.$$

$$K_3 = (0,86x_1 + 0,87x_2 + 0,89x_3 + 0,8x_4 + 0,9x_5 + 0,92x_6 + 0,97x_7 + 0,87x_8 + 0,93x_9 + 0,96x_{10})/SV.$$

$$K_4 = |SV - 4200|.$$

Решение задачи с использованием программы «Поиск решения» Microsoft Excel дало следующий результат:

$$x_1 = 56, x_2 = 0, x_3 = 176, x_4 = 56, x_5 = 0, x_6 = 116, x_7 = 0, x_8 = 0, x_9 = 3561, x_{10} = 236, W = 0,948.$$

При выборе других весовых коэффициентов свертки критериев меняется результат решения. Например, если взять  $g_1 = 0,8$  (это соответствует большей значимости критерия стоимости),  $g_2 = g_3 = 0,1$ ,  $g_4 = 0,3$ , то получим оптимальные объемы закупок в объемах:

$$x_1 = 121, x_2 = 2, x_3 = 168, x_4 = 2, x_5 = 0, x_6 = 98, x_7 = 0, x_8 = 0, x_9 = 3589, x_{10} = 220.$$

Если убрать критерий  $K_4$  (не требовать соблюдения поставок продукта заданным объемам), то получается  $x_9 = 3584$  (остальные переменные равны 0), т.е. закупки будут идти от поставщика с условием отсрочки платежа при самой низкой цене.

На практике часто по требованиям ЖД поставляется продукция полными вагонами. Для обеспечения данного требования введем дополнительное ограничение: переменные кратны 60.

Получили следующий результат:  $x_1 = 60, x_2 = 0, x_3 = 180, x_4 = 60, x_5 = 0, x_6 = 120, x_7 = 0, x_8 = 0, x_9 = 3540, x_{10} = 240$ , значения критериев  $K_1 = 0,95, K_2 = 0,94, K_3 = 0,93, K_4 = 0, W = 0,947$ . Так как оптимальные значения

критериев  $K_1 = K_2 = K_3 = 1$ ,  $K_4 = 0$ , то получили решение, очень близкое к идеальному.

*Динамическая многопродуктовая математическая  
модель деятельности генпоставщика*

Рассмотрим транспортную задачу нахождения оптимального плана поставок продукции нескольких видов. Дано:

$PP_T^R$  – объемы плановых поставок продукции вида  $R$  в период  $T$ ;

$L_T^{GR}$  – ограничения по объемам финансирования по группам ресурсов в период  $T$ .

Информация по возможности приобретения продукта у поставщика  $p$ ;

$W_{pT}^R$  – возможный объем закупок продукции вида  $R$  в период  $T$ ;

$Z_p^R$  – закупочная цена продукции вида  $R$ ;

$D_p^R$  – стоимость доставки единицы продукции вида  $R$ ;

$PZ_p^R(t)$  – вероятность задержки поставки продукции вида  $R$  на  $t$  дней;

$SS^R(t)$  – размер штрафных санкций за срыв поставок продукции вида  $R$  на  $t$  дней.

Требуется оптимизировать управление процессом закупок и поставок, соблюдая при этом план поставок и минимизируя затраты и штрафные санкции. Таким образом, ищется  $x_T^R$  – объемы и сроки поставок продукции вида  $R$ ,  $x_{Tp}^R$  – объемы и сроки закупок у поставщиков  $p$  в период  $T$ , которые удовлетворяют условиям:

$$x_T^R = \sum_{\forall p} x_{Tp}^R, \quad (3.3.24)$$

$$x_{Tp}^R \leq W_{pT}^R; \quad (3.3.25)$$

$$\sum_{\forall p} \sum_{\forall R \in GR} x_{Tp}^R (Z_p^R + D_p^R) \leq L_T^{GR}. \quad (3.3.26)$$

Ограничение плановых объемов поставок:

$$\forall S \sum_{T=1}^{S+\delta R} x_T^R \geq \sum_{\tau=1}^S PP_{\tau}^R, \quad (3.3.27)$$

где  $\delta_R$  – максимально возможный срок срыва поставок продукции вида  $R$ .

Целевой функцией является сумма издержек на закупку и транспортировку всех продуктов:

$$\sum_{T=1}^{T_{\text{оп}}} \sum_{\forall p} \sum_{\forall R} x_{Tp}^R \left( Z_p^R + D_p^R + \sum_{t=1}^{\delta} PZ_p^R(t) \times SS^R(t) \right) \rightarrow \min. \quad (3.3.28)$$

$T_{\text{оп}}$  – директивный срок завершения проекта.

Получаемые в результате решения задачи объемы  $x_{Tp}^R$  используются для заключения контрактов на поставки, обеспечивающие интересы клиента и поставщика.

*Математическая модель динамической многопродуктовой задачи, оптимизирующей поставки, учитывая приоритеты поставщиков*  
 Данная модель объединяет некоторые идеи моделей 3.3.6. и 3.3.7.

Исходные данные:

$V_{Rmin}^t, V_{Rmax}^t$  – минимально и максимально требуемые объемы поставок продукции вида  $R$  в  $t$ -й период;

$\delta_{ран}, \delta_{поз}$  – допустимые отклонения поставок от требуемых сроков;

$C_{Rp}^t$  – удельная стоимость поставляемого продукта вида  $R$  от  $p$ -го поставщика в  $t$ -й период;

$A_p$  – приоритет  $p$ -го поставщика (рассчитываются по методу, изложенному в 3.3.4, или по формуле (3.3.6));

$B_{Rpmin}^t, B_{Rpmax}^t$  – минимально и максимально необходимые объемы поставок продукта вида  $R$  от  $p$ -го поставщика в период  $t$ ;

$S_R^{tcp}$  – потери, связанные с единичными отклонениями от требуемых сроков поставок продукта вида  $R$  в  $t$ -й период;

$S_R^{тоб}$  – потери, связанные с отдельными отклонениями объемов фактических поставок продукта типа  $R$  от требуемых в  $t$ -й период;

$V_R$  – суммарная потребность проекта в продукте вида  $R$ .

Необходимо найти  $x_{tp}^R$  – объемы поставок продукта вида  $R$  от поставщика  $p$  в период  $t$ , удовлетворяющие условиям:

$$B_{Rpmin}^t \leq x_{tp}^R \leq B_{Rpmax}^t \quad (3.3.29)$$

$$\sum_{\forall p} x_{tp}^R \in \Omega V_R^t, \quad (3.3.30)$$

где  $\Omega V_R^t$  – множество допустимых по времени и объему поставок (при заданном объеме поставок продукта вида  $R$  в период  $t$   $V_R^t$  допустимы отклонения по объему от  $V_{Rmin}^t$  до  $V_{Rmax}^t$  и по времени  $t - \delta_{ран} \leq \tau \leq t + \delta_{поз}$ ).

$$\sum_{\forall p,t} x_{tp}^R = V_R. \quad (3.3.31)$$

Критерии оптимизации:

$$F_1 = \sum_{\forall t,p,R} A_p \cdot C_{Rp}^t \cdot x_{tp}^R \rightarrow \min, \quad (3.3.32)$$

$$F_2 = \sum_{\forall t,R} (|\sum_{\forall p} x_{tp}^R - V_R^t| \cdot S_R^{тоб} + |t - \tau| \cdot S_R^{tcp}) \rightarrow \min. \quad (3.3.33)$$

Предложенные выше модели реализуют оптимизационные задачи с линейными и нелинейными целевыми функциями и ограничениями. В настоящее время имеется широкий набор программных средств, обеспечивающих решение подобных задач, например, можно указать пакет Solver (Поиск решения), входящий в EXCEL. Формирование регрессионной модели и численная оценка коэффициентов регрессии в главе 3.3.3 может производиться с использованием пакета Анализ данных, который также имеется в составе EXCEL, или функции пакета STATISTICA «Нелинейное оценивание» и «Множественная регрессия».

Представленные математические модели, использующие разработанные критерии оценки поставщиков, являются эффективным средством ре-

шения задачи выбора поставщика. Они позволяют при изменяющихся внешних условиях, используя компьютерную реализацию, оперативно определять не только выгодных поставщиков, но и оптимальные объемы закупок продуктов у конкурирующих поставщиков. Рассмотренные постановки задач управления для генпоставщика могут служить алгоритмической и методологической основой при разработке прикладных пакетов программ (автоматизированной системы), обеспечивающих решение описанных выше задач управления проектом со стороны поставщика на всех этапах его реализации.

### **Глава 3.4. Математические модели управления проектами для генконтрактора, руководителя проекта и его команды**

Предлагаемые ниже математические модели управления для руководителя проекта и его команды управления предназначены для вычисления всех технико-экономических показателей проекта, формирования вариантов его выполнения для последующего выбора наиболее эффективных из них. Рассматривается при этом сложный комплексный проект, который описан с помощью сетевой модели, причем могут использоваться все типы моделей – традиционные детерминированные, вероятностные, обобщенные и альтернативные. Подробное описание этих сетевых моделей и алгоритмы расчета показателей проекта (сроков начала и окончания работ, вероятности выполнения этапов и всего проекта и пр.) изложено в части 1. Реализация проекта может осуществляться  $n$  вариантами. По каждому варианту команда проекта рассчитывает свои временные, финансовые и ресурсные показатели, социальные и экологические характеристики.

Руководитель проекта (менеджер проекта или проджект-менеджер) – юридическое или физическое лицо, которому делегируются полномочия по управлению проектом, включая процедуры планирования, контроля и координации работ всех участников проекта. Он руководит работой команды проекта – организационной структурой, создаваемой на период реализации проекта для обеспечения эффективного достижения его целей.

При выполнении крупного строительного проекта создают комплексную организацию, выполняющую функции генконтрактора – она заключает контракт с заказчиком на полное создание объекта. Например, в РАО «ЕЭС России» в 1998 году создана новая организация – компания «ЭМК-Инжиниринг». Многолетний и успешный опыт работы ОАО «Компания ЭМК-Инжиниринг» показывает, что многопрофильность, комплексный подход к решению глобальных задач в строительстве крупнейших объектов электроэнергетики, возможность реализации проекта «под ключ» позволяет заказчику получить готовый объект по оптимальной цене, в необходимые сроки и с гарантией качества.

«ЭМК-Инжиниринг» имеет менеджера по проектированию; есть менеджер по строительству, который подбирает строительные организации, проводит конкурсы, и т.п.; есть менеджеры по поставкам, эксплуатации, оборудованию и т. д. Это тип современной управляющей компании. В ней работают профессионально подготовленные менеджеры.

Генконтрактор сдает законченный объект и несет ответственность за его сопровождение. В этом отличие работы генконтрактора от прежних методов управления проектом.

Функции генконтрактора и руководителя проекта очень близки, поэтому в мы объединили описание математических моделей этих стейкхолдеров. Специфические характеристики и параметры управления проектами со стороны руководителя проекта и генконтрактора приведены в таблице 3.4.1 (строки 3 и 4).

Данные характеристики используются в полном объеме при формировании математических моделей.

#### *Функции руководителя проекта и команды управления*

*Методологические основы деятельности руководителя проекта и его команды управления.* Работа данного стейкхолдера обеспечивает деятельность по управлению проектами остальных заинтересованных сторон. Результаты работы используются другими стейкхолдерами на всех стадиях жизненного цикла проекта. Прежде всего, руководитель проекта и его команда управления конструирует детализированную и агрегированную сетевые модели проекта, которые могут быть в зависимости от специфики детерминированные, вероятностные, альтернативные, стохастические или смешанные. На основании сформированной сетевой модели проекта определяются его временные и ресурсные показатели, они согласовываются со всеми другими заинтересованными сторонами с учетом их характеристик и параметров. Степень детализации сетевой модели зависит от периода планирования и масштаба проекта. При более детальном планировании требуются дополнительные усилия при составлении расчетов, практика показывает, что удвоение точности расчетов в 4 раза увеличивает трудозатраты на планирование, погрешности результатов при этом также растут квадратично [7]. В результате экспертного исследования было установлено, что оптимальное соотношение между временным дискретом детализации и периодом выполнения проекта составляет 5%. Таким образом, на начальной стадии проекта продолжительностью 5 лет, разрабатывая альтернативные варианты управления проектом, и затем на стадии планирования проекта в целом и его отдельных этапов (вех) работы детализируются до квартала; при планировании на 2 года необходимо составлять месячные планы, а при составлении месячных планов требуется разбивать работы до дня.

Предложенные ниже алгоритмы с учетом риска и неопределенности позволяют строить и анализировать непротиворечивые модели процесса

выполнения проекта, которые способствуют формированию оптимальных планов.

*Основные задачи и функции управления, которые реализует руководитель проекта и его команда*

Основные задачи следующие:

- согласование целей, обеспечивающих требования по срокам, качеству, ресурсам, издержкам и т.д. со всеми стейкхолдерами;
- утверждение согласованных целей проекта заказчиком;
- разработка организационной структуры и порядка выполнения проекта;
- разработка альтернативных вариантов процесса реализации проекта;
- выполнение необходимых расчетов, обеспечивающих проект необходимыми ресурсами;
- разработка комплекса мероприятий по мотивации исполнителей и их реализация;
- координация участников проекта внутри проекта и во внешней среде;
- разработка информационно-аналитической системы управления проектом и обеспечение всех заинтересованных сторон технико-экономической информацией о проекте и процессе его реализации в соответствии с установленным регламентом;
- руководитель проекта и его команда реализуют следующие функции управления: управление предметной областью (управление объемами работ, содержанием проекта); управление временем; управление стоимостью и финансами; управление коммуникациями; управление качеством; управление персоналом; управление рисками; управление поставками и контрактами, включая распределение ресурсов и управление их запасами; управление изменениями; унтеграционное (координационное) управление, включая обеспечение взаимосвязей со стейкхолдерами.

Ниже представлены математические модели задач, посредством решения которых реализуются перечисленные функции управления. Соотнесение задач и функций проведено довольно условно, так как функции переплетаются, тесно взаимодействуя друг с другом. Например, управление рисками непосредственно связано с управлением финансами, временем, ресурсами, качеством и т.д. В данной главе описываются математические модели задач, реализующих основные функции управления. Необходимо отметить, что в практике зачастую происходит организационное объединение в зависимости от специфики и масштаба проекта, как заинтересованных сторон, так и функций, причем в разных сочетаниях. Командой проекта может готовиться информация, но и при этом могут выполняться расчеты, обеспечивающие реализацию функций заказчика и генпоставщика, заказчик может выполнять функции инвестора и т.п. Независимо от нахождения руководителя проекта и его команды – в составе инвестора, заказчика, подрядчика или обособлено в виде отдельной управляющей



компании профессиональных менеджеров проекта, ориентировать математические модели мы будем строго на выполнение вышеприведенных функций.

Фазы жизненного цикла проекта определяют различные задачи по каждой конкретной функции управления. Управление предметной областью на предпроектной фазе осуществляется путем создания агрегированной сетевой модели и формирования на ее базе вариантов выполнения проекта, которые отличаются сроками выполнения этапов и затратами, связанные с их реализацией. Эта же информационная база на предпроектной фазе используется для решения задач управления стоимостью и временем. Задачи управления рисками, качеством и персоналом на этой фазе используют обобщенные модели, которые дают общие представления о характеристиках проекта. Конкретные значения характеристик вычисляются на фазе реализации проекта, используя детализированное описание проекта, на этой же фазе решаются задачи управления поставками и контрактами, в том числе задачи управления распределением ресурсов и управления их запасами. В данной главе описаны математические модели задач основных функций управления, не претендуя при этом на их всеохватность и полноту.

Построенные оптимальные календарные планы выполнения проектов, а также сводный оптимальный план по комплексу проектов позволяют определить графики назначений исполнителей, необходимые потребности в ресурсах, графики использования машин и оборудования. Формируется инвестиционная матрица альтернатив  $\{I_t^k\}$ , где  $I_t^k$  – необходимый объем инвестиций в  $k$ -й вариант проекта в  $t$ -й период (месяц, квартал, год, – зависит от масштаба проекта). Прогнозируются значения матрицы прибыли  $\{V_t^k\}$ , где  $V_t^k$  – прибыль от реализации  $k$ -го варианта проекта в  $t$ -й период.  $t \in [0, T]$ , где  $T$  – срок жизненного цикла проекта от начала его выполнения до максимального срока прогноза прибыли после реализации проекта (эта информация является входной для инвестора).

В основе процесса управления выполнением проекта лежит разработка детального (пооперационного) плана производства работ, который является входным для работы генконтрактора, бизнес-плана для инвестора и плана по вехам, укрупненного комплексного плана для заказчика, календарного плана поставок для генпоставщика, плана по налогам для контролирующих органов.

Периодически (в зависимости от масштабности проекта) должна производиться актуализация входных данных, что даст возможность уточнять потребности, графики и планы (снижая, тем самым, уровень неопределенности), создаст необходимые предпосылки для реализации в сжатые сроки технологических переделов проекта и интенсификации процедур выполнения проекта в пространстве «время – ресурсы – стоимость».

### *Математическая модель управления предметной областью*

Сложный проект описывается циклической альтернативной сетевой моделью (ЦАСМ), подробно представленной в [8], при этом все другие типы сетевых моделей (классические, обобщенные, вероятностные и стохастические) – это ее частные случаи.

Отметим, что с точки зрения методологии альтернативные сетевые модели GANN и сети Эйснера [5] имеют более общий характер, так как в их структуре могут присутствовать управляемые альтернативные работы. Однако при использовании алгоритмического аппарата ЦАСМ эти элементы структуры можно свести к стохастическим, используя при этом известные методы принятия решений – сведение неопределенности к риску. При полной неопределенности применим критерий Лапласа (если  $n$  управляемых альтернативных работ выходят из некоторого события и заранее неизвестна вероятность их реализации, то она принимается равной  $1/n$ ). При известной вероятности  $p$  реализации «пессимистического» варианта реализации проекта,  $1-p$  задает вероятность (по критерию Гурвица) реализации «оптимистического» варианта.

После формирования сетевой модели рассчитываются все необходимые временные характеристики. Алгоритмы расчетов подробно приведены в [8], там же изложены алгоритмы, формирующие планы ранних и поздних сроков, планы минимальной продолжительности.

#### *Разработка укрупненного комплексного плана проекта*

Укрупненный комплексный план разрабатывает команда управления проекта на базе детализированной модели проекта, рассчитывая при этом следующие показатели:

$T_i^{\text{ран}}, T_i^{\text{поз}}$  – сроки свершений (ранние и поздние) событий  $i$  укрупненной сети;

$a_{ij}, b_{ij}$  – оценки минимальной и максимальной продолжительности работ  $(i, j)$  укрупненного графика;

$r_{ij}$  – затраты на выполнение работ  $(i, j)$  укрупненного графика.

Методы и алгоритмы формирования укрупненной сетевой модели из детальной (агрегирование работ) подробно описаны в [3]. Процедура определения дополнительных параметров работ укрупненной сетевой модели, необходимых для моделей управления другими стейкхолдерами.

По каждой укрупненной работе вычисляем  $ЭОК_{ij}$  – оценку предельно допустимой степени вариабельности ее конфигурации. Под вариабельностью конфигурации проекта понимается исключение работ из реализации, их замена, нарушение сроков их выполнения. Степень вариабельности конфигурации каждой работы  $(i, j)$  оценивается экспертно по десятибалльной системе:

$\alpha_{ij}(t)$  – срыв сроков реализации работы на  $t$  дней;

$\beta_{ij}$  – исключение работы из графика;

$\gamma_{ij}$  – изменение характеристик работы или ее замена, где оценки  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , близкие к 0, отражают малозначимые изменения, около 5 – среднезначимые величины, близкие к 10 – недопустимые значения. Остальные величины соответствуют промежуточным состояниям.

Затем определяется степень изменения конфигурации всего проекта в виде интегрированного показателя конфигурации (ИПК), который вычисляется по некоторой функции ФОК, которая задается экспертно по показателям качества реализации работ  $PK_{ij}$  укрупненного плана, которые задаются также экспертно. Проведенный авторами анализ большого количества проектов показал, что функции ФОК возрастающие, вогнутые, т.е. имеют положительные первые и вторые производные (темпы роста также возрастают). При малых значениях аргумента (небольших изменениях конфигурации работ) функции ФОК могут представляться в виде степенных функций с показателем степени  $b > 1$ . Данный показатель  $b$  является эластичностью функции, он показывает, на сколько % возрастет степень изменения конфигурации проекта при росте качества выполнения работ на 1 процент. Сформированная таким образом функция ФОК служит входной информацией для построения моделей управления Заказчика.

Расчеты, описанные выше, производятся по каждому возможному варианту выполнения проекта. Варианты формируются разными способами исходя из специфики проекта и его масштаба [15, 16]. Далее мы будем использовать один из таких способов, при дальнейшем развитии моделей будут приведены и другие методы.

#### *Отбор вариантов выполнения проекта посредством метода главных компонент*

При формировании вариантов проекта проводится анализ большого количества факторов, которые взаимосвязаны, влияют на рискованность проекта, его качество и пр. Актуальной задачей является уменьшение количества факторов и выделение наиболее значимых. Средством решения подобной задачи может являться метод главных компонент, применяемый для создания такой группировки исходных факторов, чтобы элементы группы были коррелированы между собой, но в целом группы были бы независимы.

Суть метода главных компонент.

Пусть проект описывается набором факторов  $x_{ki}^0$ , где  $k$  – номер варианта проекта ( $k = 1, \dots, N$ ),  $i$  – номер фактора ( $i = 1, \dots, m$ ),  $N$  – количество вариантов,  $m$  – количество факторов. Значения каждого  $i$ -го фактора по всем вариантам образуют вектор  $x_i^0 = \{x_{1i}^0, x_{2i}^0, \dots, x_{Ni}^0\}^T$ .

Набор этих векторов может быть представлен в виде матрицы факторов  $x^0$ , где столбцы матрицы содержат значения соответствующего фактора для разных вариантов проекта, а строки включают значения всех факторов

по отдельному варианту. Таким образом, набор вариантов проекта представляется в виде матрицы:

$$X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0]. \quad (3.4.1)$$

Среднеарифметические значения факторов по всем вариантам являются центрами распределения набора вариантов. Отцентрированный набор вариантов обозначим матрицей  $X$ , элементы которой определяются как:

$$x_{ki} = x_{ki}^0 - \bar{x}_i, \quad (3.4.2)$$

$$\text{где } \bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{ki}^0.$$

Главные компоненты применяются для создания такой группировки исходных факторов, чтобы элементы группы (главной компоненты) были коррелированы между собой, но в целом группы (главные компоненты) были бы независимы.

Весовые коэффициенты главных компонент определяются посредством решения задачи нахождения собственных значений ковариационной матрицы  $A$ :

$$(A - \lambda I)V = 0, \quad (3.4.3)$$

где  $V$  – собственный вектор уравнения (3.4.3),  $I$  – единичная матрица,  $\lambda$  – собственное значение. Полученные собственные векторы уравнения (3.4.3) нормируются так, что  $v_i^T v_i = 1$ , и являются ортогональными

$$V^T A V = \Lambda \text{ и } V^T V = I \quad (3.4.4)$$

где  $\Lambda$  – диагональная матрица, у которой коэффициенты по диагонали равны собственным значениям  $\lambda$ , удовлетворяющим (3.4.3).

Собственный вектор имеет такую же размерность, как и вектор факторов вариантов проекта, поэтому мы можем называть их собственными вариантами. Собственный вектор определяется с точностью до множителя, поэтому их компоненты анализируются не столько по величине исходных факторов, сколько по их взаимосвязи друг с другом. В дальнейшем изложении компоненты собственного варианта будут называться характеристиками собственного варианта.

Весь проект, таким образом, может быть описан комбинацией собственных вариантов, причем при этом описании используется совокупность главных компонент. Главные компоненты отражают не отдельные факторы, а группы факторов (каждая компонента представляет собственный вариант проекта).

Собственные векторы определяются по ковариационной матрице, поэтому собственные значения показывают вариабельность собственного варианта и численно равны дисперсии главных компонент.

$V^0$  строится из собственных векторов выражения (3.4.3), на ее базе формируются главные компоненты как линейные комбинации исходных

факторов  $z_{ki} = \sum_{h=1}^m v_{hi} x_{kh}$ , где  $z_{ki}$  — значение нового  $i$ -го фактора для варианта  $k$ ,  $v_{hi}$  — компонента, соответствующая исходному фактору  $h$  при преобразовании его к новому фактору  $i$ . Значения главных компонент для разных вариантов проекта объединяются в вектора  $z_i$ , из которых формируется матрица  $Z$ , определяемая как

$$Z=VX \quad (3.4.5)$$

При анализе собственных вариантов проекта проверяется, удовлетворяют ли они требованиям управления проектом. Собственные варианты, не удовлетворяющие требованиям, отбрасываются, а оставшиеся используются в качестве входной информации для задач управления другими стейкхолдерами.

Общая вариабельность процесса изменения проекта – это сумма среднеквадратичных отклонений всех факторов, которые описывают его поведение:

$$\sigma = \sum_i^n \sigma_i, \quad (3.4.6)$$

где  $\sigma_i$  – среднеквадратичное отклонение  $i$ -го фактора.

Каждая главная компонента вносит вклад в общую изменчивость проекта, который оценивается через его среднеквадратичные отклонения. Все собственные значения главных компонент в сумме равны сумме среднеквадратичных отклонений исходных факторов. Но среднеквадратичные отклонения главных компонент могут служить приближенной оценкой, так как имеется большая разница в вариабельности исходных факторов. При этом факторы с наибольшей вариабельностью доминируют в начальных главных компонентах. Этот метод значительно уменьшает объем информации, которая формируется при управлении проектом и предназначена для использования другими стейкхолдерами.

#### *Математические модели задач управления временем и алгоритмы их решения*

Управление временем тесно связано с управлением предметной областью и выполняет следующие функции:

- определение сроков важнейших событий проекта и продолжительности всех выполняемых работ;
- оптимальное использование полных и свободных резервов времени;
- оптимизация временных характеристик;
- контроль реализации проекта по временным характеристикам;
- прогноз сроков выполнения работ.

*Формирование вариантов реализации проекта на базе принципа  
«время – стоимость»*

Пусть  $a_{ij}$  – минимально допустимое время выполнения работы  $(i, j)$ , которой соответствуют затраты  $c_{ij}^a$ , и  $b_{ij}$  – максимально допустимое время выполнения работы  $(i, j)$ , которой соответствуют затраты  $c_{ij}^b$ . Значения  $a_{ij}$  и  $b_{ij}$  определяются, используя максимальную и минимальную величину основного ненакапливаемого ресурса, который может быть задействован на работе  $(i, j)$ . Учитывая колебания производительности труда, возможные сбои оборудования и другие непредвиденные затраты, считаем вышеприведенные характеристики случайными величинами с определенными законами распределения. Также предположим, что ускорение работ влечет дополнительные затраты: сверхурочные доплаты, привлечение дополнительных исполнителей и оборудования и т. п.

По заданному уровню значимости  $p$ , выполняется имитационное моделирование вышеописанных характеристик в соответствии с алгоритмом, описанном в части 1, получаются  $p$ -квантильные оценки характеристик  $W^p(c_{ij}^a)$ ,  $W^p(c_{ij}^b)$ ,  $W^p(a_{ij})$ ,  $W^p(b_{ij})$ .  $p$ -квантильная оценка  $W^p(X)$  какого-либо показателя  $X$  дает его значение, которое подтверждается практически с вероятностью большей  $p$ .

Полагая, что зависимость расходов от времени реализации имеет вид  $c_{ij} = z_{ij} - y_{ij}t_{ij}$ , получаем выражение для  $p$ -квантильного коэффициента пропорциональности

$$y_{ij}^p = (W^p(c_{ij}^a) - W^p(c_{ij}^b)) / (W^p(b_{ij}) - W^p(a_{ij})) = \Delta W^p(c) / \Delta t. \quad (3.4.7)$$

Таким образом,  $y_{ij}^p$  с вероятностью  $p$  соответствует затратам, которые связаны с сокращением сроков выполнения на единицу работы  $(i, j)$ . Если задать всем работам  $t_{ij} = W^p(a_{ij})$ , то получим минимальное критическое время  $W^p(T_{min}^{kp})$ . Это время соответствуют максимальным затратам, равным  $W^p(C_a) = \sum_{\forall(i,j)} W^p(c_{ij}^a)$ .

Если принять на всех работах  $t_{ij} = W^p(b_{ij})$ , то придем к сетевому графику, с наименьшими затратами, равными  $W^p(C_b) = \sum_{\forall(i,j)} W^p(c_{ij}^b)$ , и наибольшим критическим временем  $W^p(T_{max}^{kp})$ .

Имея наименьшее критическое время  $W^p(T_{min}^{kp})$ , можно уменьшить затраты, удлиняя некритические работы, используя полностью их  $p$ -квантильные резервы времени, т.к. увеличивая на единицу  $t_{ij}$ , мы снижаем стоимость ее на  $y_{ij}^p$ . Обозначим полученные минимальные затраты через  $C_d^p$ , тогда получаем, что при  $T^p = W^p(T_{min}^{kp})$  наименьшая стоимость равна  $C_d^p$ , и, в общем случае, при любом  $T^p \in [W^p(T_{min}^{kp}), W^p(T_{max}^{kp})]$  получаем план минимальных затрат  $C(T^p)$ . Полученный график зависимости оптимальной стоимости проекта от его продолжительности позволяет определять минимальную стоимость проекта при любом возможном сроке его выполнения

и находить минимум продолжительности проекта при заданной стоимости. Функция  $C(T^p)$  служит также для оценки дополнительных затрат, связанных с сокращением сроков выполнения проекта.

Разобьем интервал  $[W^p(T_{min}^{kp}), W^p(T_{max}^{kp})]$  на  $N$  частей  $T_1^p, \dots, T_N^p$ . Предполагая линейную зависимость затрат от продолжительности работ, для определения  $k$ -го варианта проекта требуется решить задачу линейного программирования следующего вида:

Найти такие продолжительности работ  $t_{ij}$ , при которых:

$$W^p(T_j) - W^p(T_i) - t_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j); \quad (3.4.8)$$

$$W^p(T_n^0) \leq T_k^p, \quad (3.4.9)$$

$$W^p(a_{ij}) \leq t_{ij} \leq W^p(b_{ij}), \quad (3.4.10)$$

$$C(T_k^p) = \sum_{\forall (i, j)} c_{ij} = \sum_{\forall (i, j)} (z_{ij} - y_{ij} t_{ij}) \rightarrow \min, \quad (3.4.11)$$

или

$$\sum_{\forall (i, j)} y_{ij} t_{ij} \rightarrow \max. \quad (3.4.12)$$

В результате будет получен  $k$ -й вариант плана минимальной стоимости, который соответствует времени выполнения проекта

$T_k^p$  ( $k = 1, \dots, N$ ) и суммарно объемам финансирования  $C(T_k^p)$ .

При помощи этого алгоритма определяются оптимальный вариант финансирования проекта при заданном уровне значимости  $p$  в условиях неопределенности и риска.

При этом рассчитываются все необходимые для дальнейшего анализа проекта его временные характеристики:  $p$ -квантильные оценки сроков начала и завершения работ ( $W_k^p(T_i^{\text{пан}}), W_k^p(T_i^{\text{поз}})$ ) и др.

#### *Математическая модель управления финансами и стоимостью*

Функции управления финансами и стоимостью проекта включают в себя определение сметы расходов, бюджета проекта, источников финансирования, планирование денежных потоков, прогноз доходов и прибылей. Главная задача управления финансами и стоимостью – соблюдение бюджета проекта и получение плановой прибыли от его реализации.

Входной информацией для этих задач является набор вариантов планов минимальной стоимости, процесс формирования которых описан в части 1 с использованием вероятностной и альтернативной природы сетевой модели проекта.

А. Для каждого варианта проекта со сроком его реализации  $T_k^p$  и стоимостью  $C(T_k^p)$  рассчитывается необходимый объем инвестиций  $I_k^t$  в вариант проекта  $k$  в  $t$ -й период, при этом используются математические ожидания продолжительностей всех работ. Периодами проекта в зависимости от его масштаба могут быть год, месяц, квартал. Таким образом, формируются:

$I_k^t = \sum_{\forall (i, j) \in t} c_{ij}$  – необходимый объем инвестиций в вариант проекта  $k$  в период  $t$  (суммируем по всем работам, реализуемым в период  $t$ ).

Получаем набор альтернативных вариантов выполнения проекта  $P(K, T)$ , где  $K$  – вектор объемов финансирования проекта в целом и его этапов,  $T$  – вектор сроков выполнения проекта и его частей).

После расчета математических ожиданий сроков начала и окончания всех работ, в том числе и пусковых комплексов, формируются  $V_k^t$  – прогнозы прибыли от реализации варианта проекта  $k$  в  $t$ -й период. При этом рассчитывается сумма всей прибыли от пусковых комплексов, введенных в действие в период  $t$ .

Б. Рассчитывается сетевая модель проекта по ранним и поздним срокам начала работ в пределах от  $W_k^p(T_i^{\text{ран}})$  до  $W_k^p(T_i^{\text{поз}})$ , при этом инвестиции в проекты  $k$  ( $k = 1, \dots, N$ ) в  $t$ -й период будут изменяться в пределах от  $I_{kmin}^t$  до  $I_{kmax}^t$ . Чистый дисконтированный доход  $k$ -го варианта проекта на начало  $t$ -го периода в зависимости от минимального и максимального объема инвестиций будет составлять  $NPV_{kmin}^t$  и  $NPV_{kmax}^t$ , а прогнозируемые оценки риска составят соответственно  $r_{kmin}^t$  и  $r_{kmax}^t$ .

В результате получается множество альтернатив  $P(K, T)$  с использованием при этом вероятностной и альтернативной природы сетевой модели проекта. Данное множество отличается от приведенного в 3.4.6 заданием диапазонов величин формируемых показателей (чистый дисконтированный доход, объемы инвестиций, прогнозируемые оценки риска).

После этого формируется  $F(K, T)$  – функция зависимости ликвидности проекта от сроков его реализации и объемов финансирования. Эта функция, задаваемая экспертно на дискретном множестве значений определяющих ее факторов  $P(K, T)$ , и набор вариантов выполнения проекта являются входной информацией, используемой математическими моделями управления инвестора.

#### *Математические модели управления качеством*

Управление качеством проекта обеспечивается формированием требований и стандартов качества результатов проекта, реализацией выполнения этих требований в процессе выполнения проекта посредством системы контроля и поддержки. При этом требования к проекту бывают многоаспектны и, часто, противоречивы. Например, выполнение экологических требований приводит к увеличению затрат, что будет противоречить требованиям инвестора. В данной главе будет рассмотрена модель управления качеством, основанная на назначении исполнителей.

Многие факторы влияют на качество проекта, основные из которых: затраты исполнителей; сроки выполнения работ; качество работы исполнителей.

При этом затраты являются основополагающим фактором, а качество работы исполнителей и сроки выполнения работ зависят от произведенных затрат. Также и другие факторы оказывают большое влияние на качество проекта (качество оборудования, строительных материалов и пр.), но в



данном пункте мы рассматриваем факторы, которыми управляет руководитель проекта и его команда.

Если нам известны статистические или иные характеристики выбранных факторов, то мы можем сформулировать задачу управления качеством, состоящую из двух этапов. На первом этапе А отбираются исполнители, обеспечивающие максимальное качество. Эту задачу необходимо решать на стадии формирования состава исполнителей. Далее на этапе Б решается задача нахождения максимального качества проекта с фиксированным составом исполнителей. Проведенный анализ показал, что повышение качества при фиксированном составе исполнителей происходит за счет увеличения финансирования. Так как, зачастую, финансирование ограничено, то и возможности такого управления ограничены.

А. Пусть  $t_{ij}^s(c_{ij})$  – продолжительность работы  $(i, j)$  с затратами  $c_{ij}$  при выполнении ее исполнителем  $s$ ;

$q_{ij}^s(c_{ij})$  – качество работы  $(i, j)$  с затратами  $c_{ij}$  при выполнении ее исполнителем  $s$ ;

$p$ -квантильные оценки  $W^p(c_{ij}^a), W^p(c_{ij}^b), W^p(a_{ij}), W^p(b_{ij})$ .

Модель отбора исполнителей проекта, обеспечивающая его максимальное качество, имеет следующий вид:

Найти:

$$x_{ij}^s = \begin{cases} 1, & \text{если работу } (i, j) \text{ выполняет исполнитель } s, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.4.13)$$

При ограничениях

$$W^p(T_j) - W^p(T_i) - t_{ij}^s(c_{ij}) \geq 0 \text{ для всех работ } (i, j); \quad (3.4.14)$$

$$W^p(a_{ij}) \leq t_{ij}^s(c_{ij}) \leq W^p(b_{ij}), \quad (3.4.15)$$

$$W^p(c_{ij}^b) \leq c_{ij} \leq W^p(c_{ij}^a). \quad (3.4.16)$$

Целевая функция:

$$\sum_{\forall s, (i, j)} x_{ij}^s q_{ij}^s(c_{ij}) \rightarrow \max. \quad (3.4.17)$$

Данная модель является модифицированной задачей назначений, которая может быть решена стандартным симплекс-методом.

Б. На втором этапе к уже отобраннным исполнителям добавляются ограничения по объемам финансирования  $\tilde{Q}_t$  в периоды  $t$ , которые (год, квартал, месяц) зависят от масштаба проекта. Величины  $\tilde{Q}_t$  определяются возможностями инвестора и заказчика.

Модель имеет следующий вид:

Найти  $c_{ij}^t$  и  $t_{ij}^s(c_{ij})$  для всех работ и отобраннных исполнителей при ограничениях

$$\sum_{\forall (i, j) \in t} c_{ij}^t \leq \tilde{Q}_t; \quad (3.4.18)$$

$$c_{ij} \sum_{\forall t} c_{ij}^t; \quad (3.4.19)$$

$$W^p(T_j) - W^p(T_i) - t_{ij}^s(c_{ij}) \geq 0 \text{ для всех работ } (i, j); \quad (3.4.20)$$

$$W^p(a_{ij}) \leq t_{ij}^s(c_{ij}) \leq W^p(b_{ij}), \quad (3.4.21)$$

$$W^p(c_{ij}^b) \leq c_{ij} \leq W^p(c_{ij}^a). \quad (3.4.22)$$

Целевая функция:

$$\sum_{\forall s, (i,j)} q_{ij}^s(c_{ij}) \rightarrow \max. \quad (3.4.23)$$

В результате решения задач по моделям А, Б для каждого варианта проекта, сформированного в 3.4.3, формируется  $F(K, T)$  – функция, отражающая зависимость качества проекта от набора  $K$  (объемы финансирования отдельных этапов проекта) и вектора  $T$  (сроки реализации отдельных пусковых комплексов проекта). Эта функция и набор вариантов реализации проекта являются входной информацией задач управления заказчика.

#### *Модель управления рисками*

Задачи управления рисками включают в себя их количественную оценку и разработку мероприятий по снижению отрицательных рисков. Риски бывают как внутренние, так и внешние к организации руководителя проекта. Внутренние риски могут быть связаны непосредственно с проектными решениями, с технологией работ, строительством или эксплуатацией объекта. Кроме того, они могут быть связаны с неудачной организацией проекта или с кадровой, материальной неспособностью обеспечить желаемую результативность.

К внешним рискам относятся: финансовая политика государства; деятельность рынков сырья, оборудования, комплектующих; окружающая среда; социальные воздействия; форс-мажорные обстоятельства.

С помощью количественной оценки рисков определяются:

вероятность достижения целей проекта; степень влияния риска на объемы непредвиденных затрат и потребность в материалах; риски, требующие большего внимания и скорейшего реагирования, а также их влияние на проект; предполагаемые сроки реализации проекта и его этапов; фактические затраты.

Процедура идентификации рисков и вычисления их количественных оценок весьма трудоемкая, методы определения оценок разнообразны и подробно описаны в литературе [18]. В данной главе оценку рисков предлагается производить на базе статистических результатов, используя имитационное моделирование. Практическую реализацию имитационного моделирования можно осуществлять с помощью пакета «RiskMaster», разработанного в Гарвардском университете. Пакет осуществляет генерирование случайных чисел на основе датчика случайных чисел, рассчитываемых по соответствующему алгоритму. Пакет обладает возможностью генерации коррелированных случайных чисел, что является его особенностью.

Важной составляющей в данном методе является анализ корреляции переменных, включенных в модель. Включение в модель коррелированных переменных может повлечь за собой серьезные искажения результатов анализа риска. Наличие корреляции переменных ограничивает независи-

мый выбор для них отдельных значений. При случайном выборе одной из двух коррелированных переменных другая выбирается в диапазоне значений, который определяется смоделированным значением 1-й переменной. При установлении силы корреляции и ее направления применяется регрессионный анализ.

Результат имитационного моделирования – вероятностные характеристики предполагаемых сроков реализации проекта, включая его основные этапы ( $M(T_i)$  – математическое ожидание и  $\sigma(T_i)$  – среднеквадратическое отклонение), характеристики ожидаемых продолжительностей работ ( $M(t_{ij})$  и  $\sigma(t_{ij})$ ) и прогнозируемых затрат ( $M(c_{ij})$  и  $\sigma(c_{ij})$ ).

При изменении сроков окончания пусковых комплексов и всего проекта в целом, а также изменении прогнозируемых затрат производится пересчет  $V_k^t$  – прогнозных значений прибыли от выполнения  $k$ -го варианта проекта в период  $t$ . Получается прогноз риска недополучения прибыли  $r_k^t$  по варианту проекта  $k$  в период  $t$ .

На основе описанных выше данных решается многокритериальная задача расчета стоимостных и временных показателей проекта с целевыми функциями минимизации отклонений общих затрат на реализацию проекта и срока его выполнения от заданных директивно  $C$  и  $T_n$ .

Модель имеет вид:

найти продолжительности работ  $t_{ij}$  и их стоимости  $c_{ij}$ , чтобы:

$$M(T_j) + \sigma(T_j) - M(T_i) - \sigma(T_i) - t_{ij} \geq 0 \text{ для всех работ } (i, j); \quad (3.4.24)$$

$$M(t_{ij}) - \sigma(t_{ij}) \leq t_{ij} \leq M(t_{ij}) + \sigma(t_{ij}), \quad (3.4.25)$$

$$M(c_{ij}) - \sigma(c_{ij}) \leq c_{ij} \leq M(c_{ij}) + \sigma(c_{ij}), \quad (3.4.26)$$

$$C - \sum_{\forall(i, j)} c_{ij} \rightarrow \min, \quad (3.4.27)$$

$$T_n - M(T_n) \rightarrow \min. \quad (3.4.28)$$

Целевые функции (3.4.27) и (3.4.28) противоречивы, поэтому выбирается одна из них в зависимости от специфики проекта, при этом другая переводится в ограничение (например, минимизация отклонения от директивного срока реализации проекта при задании ограничения на отклонения по стоимости). Таким образом, данная модель обеспечивает снижение негативных рисков по отклонениям от сроков и затрат на выполнение проекта.

#### *Модель управления ресурсами*

Распределение ограниченных ресурсов с использованием сетевой модели проекта рассматривается для работ, имеющих постоянную или переменную интенсивностью их выполнения.

Входной информацией для задачи распределения ресурсов является детализированный график производства работ. Так как ЦАСМ при описании проекта использует обобщенные связи, которые позволяют в качестве событий выделять не только начала и окончания работ, но и их промежуточ-

ные состояния, то приведенная ниже постановка задачи осуществляет реализацию двух дополнительных возможностей:

– выбор в заданных пределах интенсивности выполнения каждой работы ЦАСМ;

– учет изменений интенсивностей выполнения отдельных частей каждой работы.

Пусть  $r_{ij}^k$  – интенсивность потребления на работе  $(i, j)$   $k$ -ого ресурса типа мощности (ненакапливаемого).

Пусть  $\varepsilon^k$  – набор работ, потребляющих ресурс  $k$ , а  $\varepsilon_t^k$  – набор работ, потребляющих ресурс  $k$  в  $t$ -й момент времени ( $\varepsilon^k = \bigcup_{\forall t} \varepsilon_t^k$ ), тогда:

$w_{ij}^k = \sum_{(i, j) \in \varepsilon^k} r_{ij}^k$  – потребность в ненакапливаемом  $k$ -м ресурсе на работе  $(i, j)$ ;

$V^k = \sum_{(i, j) \in \varepsilon^k} w_{ij}^k$  – общая потребность на весь проект в  $k$ -ом ресурсе.

Пусть функция  $A^k(t)$  задает наличие ресурса  $k$  в каждый момент времени  $t$ .

Обозначим потребность в  $k$ -м ресурсе в  $t$ -й момент времени как  $F^k(t) = \sum_{(i, j) \in \varepsilon^k} r_{ij}^k$ ,  $k \in K$ .

$\gamma$  – индекс накапливаемого ресурса.

Получаем математическую модель задачи распределения ограниченных ресурсов с переменными интенсивностями следующего вида:

Найти сроки начала и окончания работ  $(i, j)$   $T_i^* \in [W_p(T_i^p), W_p(T_i^n)]$  и  $T_j^* \in [W_p(T_j^p), W_p(T_j^n)]$ , такие что:

$$t_{ij}^{\min} \leq T_j^* - T_i^* \leq t_{ij}^{\max} \quad \forall (i, j); \quad (3.4.29)$$

$$T_j^* - T_i^* \geq W_p(\psi_{ij}) \quad \forall (i, j); \quad (3.4.30)$$

$$A^k(t) \geq F^k(t) \quad \forall t \text{ и } k; \quad (3.4.31)$$

$$\sum_{t=1}^{\tau} A^{\gamma}(t) \geq \sum_{t=1}^{\tau} F^{\gamma}(t) \text{ для всех } \tau \text{ и } \gamma; \quad (3.4.32)$$

$$F = \sum_{\forall (i, j)} \{T_j^* - T_i^* - t_{ij}^{\min}\} \rightarrow \min. \quad (3.4.33)$$

Ограничение (3.4.30) обеспечивает нахождение продолжительности работ или их частей в соответствующих границах, которые определяются по формуле:

$$t_{ij}^{\min(\max)} = v_{ij}^k / r_{ij}^k \max(\min),$$

где  $r_{ij}^k \min$  и  $r_{ij}^k \max$  – соответственно минимальные и максимальные интенсивности потребления ненакапливаемого ведущего  $k$ -го ресурса на работе  $(i, j)$ ,  $v_{ij}^k$  – трудоемкость реализации работы  $(i, j)$  по  $k$ -му ведущему ресурсу.

Ведущими ресурсами являются только нескладируемые ресурсы (оборудование, станки, машины, исполнители и др.), количество которых определяет продолжительность каждой работы.

Ограничение 3.4.31 отражает тот факт, что в каждый момент времени  $t$  потребность в ненакапливаемом  $k$ -м ресурсе не больше его наличия.

Формула 3.4.32 задает следующее условие: общая потребность в накапливаемом ресурсе  $\gamma$  с начала планового периода до любого момента  $t$  не должна превышать общего объема поставок этого вида ресурса в соответствующий период.

Целевая функция 3.4.33 обеспечивает формирование плана работ с максимально возможными интенсивностями их выполнения.

Алгоритм решения вышеприведенной задачи подробно рассмотрен в главе 1.

В результате формируется детализированный сетевой график реализации проекта, обеспеченный ресурсами типа мощности, затем производятся расчеты потребностей остальных ресурсов. Эта информация является входной для поставщика.

Предложенные варианты постановок задач для команды управления проектом могут являться основой для разработки многовариантной системы управления проектами. Приведенные выше модели при этом позволят реализовать многие компетенции команды проекта и его руководителя в процессе реализации проекта.

### **Глава 3.5 Модели и механизмы управления проектами для регулирующих и надзорных органов**

Сложный проект может быть реализован  $N$  вариантами. Все варианты имеют свои финансовые показатели, социальные и экологические характеристики. Предлагаемые ниже математические модели могут быть использованы при выборе наиболее эффективных вариантов реализации проекта с точки зрения заинтересованной стороны – регулирующих органов. Данные модели способствуют повышению эффективности деятельности регулирующих органов, обеспечивают реализацию его компетенций и достижение запланированных целей при выполнении проекта.

Регулирующие и надзорные органы (органы власти) – заинтересованная сторона, которая удовлетворяет свои интересы, получая налоги от участников проекта, выдвигая и поддерживая социальные, экологические и другие государственные и общественные требования, связанные с выполнением проекта. Данные требования связаны с возможными воздействиями проекта на окружающую среду и необходимы для сведения к минимуму негативных последствий или их нейтрализации.

Примеры некоторых видов воздействий:

Экономические: влияние на микро- и макроуровне, определяемое в терминах конкурентоспособности, экономического роста, изменений в затратах разных групп экономических агентов; воздействие на инновационный потенциал и технологическое развитие; воздействие на цены; изменение в инвестиционной активности; изменения рыночных долей и др.

Конкретные примеры экономического воздействия: изменение рыночной стоимости жилья в результате реализации проекта строительства в непосредственной близости от него торгового центра, крупного промышленного предприятия или станции метро; ухудшение условий вылова рыбы в результате строительства выше по течению реки «вредного» производства (например, металлургического завода); повышение средней скорости движения транспортных средств в результате реализации соответствующих проектов, что ведет к уменьшению оборотных средств получателей и/или отправителей грузов; увеличение прибыли сельскохозяйственных предприятий при строительстве новых дорог в сельской местности (снижаются потери при ввозе удобрений и вывозе готовой сельскохозяйственной продукции, а также затраты на эксплуатацию машинного парка).

Социальные: воздействие на права человека, человеческий капитал, гендерное равенство; бедность и социальное неравенство; качество и уровень занятости; безопасность (включая уровень преступности); здоровье, культура; поддержка различных социальных групп.

Экологические: воздействие на климат, общественное здоровье; уровень загрязнения почвы, воздуха, воды, биоразнообразия и т.п.

На практике функции регулирования возлагаются на контрольно-надзорные органы. В регионах это соответствующие подразделения администрации Губернаторов и Министерства экономического развития. Во многих регионах (например, Санкт-Петербург, Калужская область, Пермский край) созданы специальные центры (в виде Корпораций развития или региональных Агентств) для осуществления разносторонней поддержки проектов.

Эти органы взаимодействуют с организациями, обеспечивающими предоставление инвесторам разных льгот и инструментов поддержки, для соблюдения интересов региона при осуществлении инвестиционных проектов.

#### *Регулирование проектов со стороны государства*

*Цели государственного регулирования.* Значимые цели государственного регулирования следующие:

- благосостояние общества, экономическая и социальная стабильность;
- изменение структуры народного хозяйства для обеспечения выхода на новые технологии;
- снижение материального неравенства в пределах естественного различия эффективности производства территорий, отраслей, профессий;
- преодоление социальных, экономических и региональных диспропорций, обеспечивающих новые траектории развития;
- достижение оптимального уровня безработицы;

- создание благоприятных условий для инвестиционного процесса, обеспечивающих экономический рост;
- повышение роли малого и среднего бизнеса в экономическом развитии;
- решение проблем демографии посредством удовлетворения потребностей в жилье, квалифицированной медицинской помощи, дошкольных учреждениях;
- формирование человеческого потенциала;
- обеспечение условий безопасного проживания населения.

Указанные цели органы власти в ряде проектов достигают, одновременно выступая в роли инвестора или заказчика, или поставщика, и также контроллера, решая соответствующие задачи, описание математических моделей которых было приведено выше. При этом всегда за регулируемыми органами остаются функции определения и сбора налогов от исполнителей проекта, формирование социальных, экологических и других государственных и общественных требований, связанных с осуществлением проекта, и контроль их выполнения. Многофункциональные роли органов власти выполняются, прежде всего, при реализации национальных и социально значимых проектов.

Регулирующие органы многообразны и многочисленны, их функции и состав подробно описаны [16].

Таким образом, существует довольно широкий перечень возможных сочетаний вариантов функций и ролей регулирующих органов, считаем весьма перспективным проведение дальнейших исследований реализованных масштабных проектов и рассмотрение всех подобных вариантов, включая комплексы задач.

Ниже в соответствии с наиболее возможными воздействиями проекта на окружающую среду мы выделили 3 комплекса задач, необходимых решать в первую очередь регулирующим органам: оценка и минимизация экологических рисков; максимизация сбора налогов; повышение качества жизни людей.

Деятельность регулирующих органов играет большую роль в экологическом менеджменте, она заключается в анализе и выдвигании требований к негативным воздействиям проекта (нанесение ущерба окружающей среде в виде выбросов в атмосферу ядовитых веществ, сбросы отходов в воду, утилизация твердых отходов производственной деятельности). Следует особо отметить, что слабая проработка экологических требований ведет к существенному превышению сметной стоимости проекта и сроков реализации.

Так, например, корейские специалисты детально проанализировали ход мегапроекта КТХ («Korea Train eXpress») сооружения скоростной железной дороги Сеул – Тегу – Пусан (Seoul – Daegu – Busan) [21]. Общая

протяженность дороги составляла 412 км. После того, как стоимость проекта возросла с 5, 8 до 18, 4 млрд. долл., а время создания дороги выросло с 7 до 12, 5 лет, правительство под давлением общественности разделило дорогу на два пусковых участка, первый из которых был пущен в 2004г. Второй участок был завершен только в 2010г. Дорога состоит из 26 секций, из которых критичными оказались всего три секции. Они-то и определили перерасход средств и времени. Все остальные секции были завершены даже раньше запланированного времени.

Наибольший вклад в нарушение сроков внес участок 2–1, составляющий менее 4% общей протяженности линии (задержка на 4 года из общих 5 лет задержки проекта), в связи с неспособностью собственников стратегически планировать сложный проект, частыми изменениями маршрута из-за неудовлетворительного исследования грунтов, а также ряда задержек в получении разрешений и экспертиз на ранних стадиях проектирования. К примеру, проектирование задержалось на два года в связи с обнаружением заброшенной шахты вблизи тоннеля, что привело к изменению маршрута и перепроектированию линии [21].

Известным примером превышения стоимости и сроков выполнения проектов является здание Оперы в Сиднее, где затраты на строительство (более 100 млн. дол.) в 16 раз превысили сметные расчеты (7 млн. дол.). Завершить проект планировали за 5 лет, реально срок реализации составил свыше 16 лет. Здесь также основной причиной срывов являлась неудовлетворительная проработка экологических вопросов на ранних этапах проектирования.

Эти примеры показывают роль государственных органов не только как регулирующих, но и как Инвестора и Заказчика; на совмещение разных функций в одной заинтересованной стороне мы указывали выше.

Несмотря на необходимость и важность деятельности регулирующих органов, следует отметить недостатки их работы в РФ. Они все за счет проекта стремятся решать свои муниципальные или государственные проблемы, такие как: благоустройство территории, проведение электричества, воды, канализации, телефонов, прокладка или асфальтирование дорог, переселение из ветхого жилья и т.д. и т.п. Это можно было рассматривать в положительном аспекте, если бы данные органы работали эффективно. Большое количество регулирующих организаций выполняют дублирующие и, часто, противоречивые проверки, тратят на них время и огромные деньги, что ложится тяжелой обузой на бизнес.

В 2016 году в отношении юридических лиц и индивидуальных предпринимателей проведено 3 063 тыс. контрольно-надзорных мероприятий. По сравнению с 2015 г. общее количество проверок, проведенных федеральными органами исполнительной власти, уменьшилось на 6, 5%. В то же время количество контрольно-надзорных мероприятий на региональном уровне в 2016 г. увеличилось на 111%. При этом плановыми яв-



лялись лишь 37% проверок, а внеплановыми соответственно 63%. Основания для проведения внеплановых проверок органов регионального контроля в 2016 году не подтвердились почти в половине случаев.

Следует отметить также увеличение количества трудовых ресурсов на проведение контрольно-надзорных мероприятий. Так, в 2016 году общая штатная численность сотрудников федеральных органов исполнительной власти по контролю (надзору), увеличилась по сравнению с 2015 годом на 5%, что составило 178 212 ед. Сотрудников региональных контрольных органов на 31% – 21 799 ед. Таким образом, всего на федеральном и региональном уровнях в мероприятия по контролю было вовлечено 181 295 сотрудников контрольных органов (по занятым штатным единицам, около 10% единиц оставалось вакантными).

Общее время проведения проверок составило 12 493 тысяч рабочих дней для федеральных органов исполнительной власти, 1 085 тыс. рабочих дней для региональных контрольных органов. Причем, если на федеральном уровне время проведения проверок изменились незначительно, то на региональном увеличились в три раза по сравнению с 2015 годом. Одна проверка обходится бюджету в среднем в 30 тыс. руб. Таким образом, на контроль государство тратит в год около \$3 млрд.[6].

Административная нагрузка на бизнес оценивается посредством рейтинга DoingBusiness, который составляет Всемирный банк. На первом месте в 2017 году – Новая Зеландия, успех которой выглядит еще более впечатляющим, если учесть, что она опередила Сингапур (занял второе место), бессленно возглавлявший данный рейтинг на протяжении 10 лет.

В Топ-10 экономических держав с самыми благоприятными условиями для осуществления предпринимательской деятельности авторы Doing Business также включили: Данию, Гонконг (КНР), Республику Корею, Норвегию, Великобританию, США, Швецию, Республику Македонию. Кроме того, эксперты отметили ряд государств, добившихся за последний год весомых результатов в улучшении бизнес-климата и реализовавших не менее трех реформ. Это – Объединенные Арабские Эмираты, Бруней Даруссалам, Индонезия, Бахрейн, Казахстан, Беларусь, Грузия, Сербия, Пакистан, Кения. Россия поднялась в рейтинге DoingBusiness с 51 на 40 место.

Таким образом, в настоящее время наиболее актуальной проблемой является повышение эффективности работы контролирующих органов за счет четкого определения реализуемых ими задач, оптимизации их структуры, и регламентации деятельности. Приведенные ниже математические модели должны способствовать построению в будущем эффективной системы регулирования экономики РФ.

*Модель оценки экологических рисков проекта и степени  
его социальной значимости*

Оценку экологического риска необходимо определять как вероятность наступления неблагоприятных событий, например, выброса вредных веществ или аварии, так и вероятности негативных последствий этих событий, например, гибели или заболеваний населения. На первом шаге оценки экологического риска производится его идентификация.

Исходными данными при идентификации экологических рисков являются следующие группы факторов:

- 1) используемые материалы, оборудование, карта технологических процессов;
- 2) технологические регламенты и прочие материалы, в которых содержится информация о характеристиках применяемого оборудования, сырья и материалов, технологического процесса;
- 3) материалы испытаний и лабораторных исследований, производимых при осуществлении производственного и экологического контроля соблюдения санитарных и прочих правил;
- 4) протоколы измерений показателей вредных и опасных производственных факторов, напряженности трудовых процессов;
- 5) санитарно-эпидемиологическая оценка, проводимая органами государственного надзора;
- 6) данные проверок соблюдения промышленной безопасности, охраны окружающей среды и труда;
- 7) данные расследований профессиональных заболеваний, инцидентов, несчастных случаев и аварий.

Оценку экологического риска предлагается произвести с помощью методов многомерных экспертных оценок. Каждый эксперт  $j$  на первом этапе идентифицирует экологические риски всех вариантов проекта ( $i = 1, \dots, N$ ) и заполняет таблицу 3.5.1 по десятибалльной системе.

$a_{ij}^k$  – оценка экспертом  $j$  варианта проекта  $i$  по  $k$ -й ( $k = 1, \dots, 7$ ) группе исходных факторов, приведенных выше. Значение  $a_{ij}^k = 1$  соответствует минимальному риску,  $a_{ij}^k = 10$  максимальному.  $\tilde{A}_{ij}$  – сумма взвешенных оценок экологических рисков  $i$ -го варианта проекта, полученных  $j$ -м экспертом.  $\lambda_k$  – весовые коэффициенты, соответствующие степени важности исходных факторов при идентификации экологических рисков.

Затем проводится нормализация полученных оценок:

$$A_{ij} = \frac{\tilde{A}_{ij} \cdot N}{\max_{i,j} \tilde{A}_{ij}}. \quad (3.5.1)$$

Таблица 3.5.1

## Оценка экологического риска

Варианты проекта	Группы факторов							Взвешенная сумма оценок
	1	2	3	4	5	6	7	
1 вариант проекта	$a_{1j}^1$	$a_{1j}^2$	$a_{1j}^3$	$a_{1j}^4$	$a_{1j}^5$	$a_{1j}^6$	$a_{1j}^7$	$\tilde{A}_{1j} = \sum_{k=1}^7 \lambda_k a_{1j}^k$
2 вариант проекта	$a_{2j}^1$	$a_{2j}^2$	$a_{2j}^3$	$a_{2j}^4$	$a_{2j}^5$	$a_{2j}^6$	$a_{2j}^7$	$\tilde{A}_{2j} = \sum_{k=1}^7 \lambda_k a_{2j}^k$
...								
$N$ вариант проекта	$a_{Nj}^1$	$a_{Nj}^2$	$a_{Nj}^3$	$a_{Nj}^4$	$a_{Nj}^5$	$a_{Nj}^6$	$a_{Nj}^7$	$\tilde{A}_{Nj} = \sum_{k=1}^7 \lambda_k a_{Nj}^k$

Затем проводится нормализация полученных оценок:

$$A_{ij} = \frac{\tilde{A}_{ij} \cdot N}{\max_{i,j} \tilde{A}_{ij}}. \quad (3.5.1)$$

Второй этап заключается в вычислении степени согласованности результатов оценивания каждой парой экспертов, используя модифицированный коэффициент ранговой корреляции Спирмена. При этом в качестве рангов проектов берутся их нормализованные суммы взвешенных оценок экологических рисков, которые вычисляются по формуле (3.5.1), в чем и заключается суть модификация.  $R$  – коэффициент корреляции Спирмена определяется по следующей формуле:

$$R = 1 - \frac{6 \sum_i d_i^2}{N^3 - N}, \quad (3.5.2)$$

где  $N$  – количество рассматриваемых вариантов проекта,  $d_i = A_{ij_1} - A_{ij_2}$  – разность сумм взвешенных оценок варианта проекта  $i$  двух экспертов  $j_1$  и  $j_2$ .

Максимум значения степени согласованности экспертов (+1) достигается при совпадении рангов обоих экспертов, а минимальное значение –1 соответствует случаю противоположных мнений экспертов.

Таким образом коэффициенты корреляции Спирмена вычисляются между всеми парами экспертов, количество которых всего  $C_m^2$ .

Затем эти коэффициенты анализируются на предмет выявления экспертов с отличающимися оценками от остальных. Такие эксперты не обязательно могут быть коррумпированными или некомпетентными, они, возможно, обладают дополнительной информацией, которую следует предоставить другим экспертам, после чего провести повторное оценивание. При повторении отклонений следует принимать решение об исключении их из группы экспертов.

На следующем этапе вычисляется *коэффициент конкордации*, который определяет согласованность мнений всей группы экспертов.

Для этого полученные  $m$  экспертами нормализованные суммы взвешенных оценок проектов заносим в табл. 3.5.2. Последний столбец таблицы содержит суммы оценок всех экспертов по каждому проекту  $i$ . Переставим строки по возрастанию этих сумм. Обозначим через  $\bar{A}_i$  их среднее значение:

$$\bar{A}_i = \sum_{j=1}^m A_{ij} / m. \quad (3.5.3)$$

Затем рассчитывается сумма квадратов отклонений:

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (A_{ij} - \bar{A}_i)^2. \quad (3.5.4)$$

Эта величина характеризует степень согласованности мнений всех экспертов. Полностью согласованные мнения экспертов соответствуют значению  $S = 0$ . Коэффициент конкордации, отражающий степень согласованности мнений всех экспертов определяется следующим образом:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 (N^3 - N)}. \quad (3.5.5)$$

Коэффициент конкордации  $W$  принимает значения от 1 до 0, чем ближе  $W$  к 0, тем выше степень согласованности экспертов.

Таблица 3.5.2

Данные для расчета  
коэффициента конкордации

Вариант проекта	Эксперты				Суммы
	1	2	...	$m$	
1-й	$A_{11}$	$A_{12}$	...	$A_{1m}$	$\sum_{j=1}^m A_{1j}$
2-й	$A_{21}$	$A_{22}$	...	$A_{2m}$	$\sum_{j=1}^m A_{2j}$
...	...	...	...	...	
$N$ -й	$A_{N1}$	$A_{N2}$	...	$A_{Nm}$	$\sum_{j=1}^m A_{Nj}$

Организация работа с экспертами по их информированию, отсеву и последующим перерасчетам осуществляется до тех пор, пока не будет получено значение  $W \leq 0.15$ , показывающее высокую степень согласованности мнений экспертов. Значения  $\bar{A}_i$ , вычисленные по (3.5.3), будут тогда являться обобщенными оценками экологического риска вариантов проекта. В случае длительного периода реализации сложного проекта оценка его экологического риска может отличаться по годам, тогда вышеприведенную процедуру проводят по каждому году отдельно, получая оценки  $\bar{A}_i^t$ .

Вклад проекта в повышение качества жизни, в улучшение социальной среды отражают социальные результаты проекта. Они характеризуются оценками следующих видов:

- 1) доходы населения (включая среднюю зарплату и прочие выплаты);
- 2) уровень обеспеченности населения товарами потребительского назначения и услугами; цены и тарифы на них;
- 3) обеспечение жильем, хозяйственно-бытовыми объектами и коммунальными услугами;
- 4) занятость населения (число новых рабочих мест); подготовка и переподготовка кадров;
- 5) обеспечение населения объектами здравоохранения, образования, спорта, культуры и искусства, транспортного обслуживания;
- 6) социальная безопасность (уровень правонарушений и преступности);
- 7) здоровье и продолжительность жизни (развитие сферы здравоохранения, уровень обслуживания, улучшение условий труда).

Оценка степени социальной значимости проекта проводится по алгоритму, приведенному в 3.5.2, при этом на первом этапе определяются  $b_{ij}^k$  – оценки экспертом  $j$  варианта проекта  $i$  по  $k$ -му ( $k = 1, \dots, 7$ ) виду качества жизни,  $\tilde{B}_{ij}$  – суммы взвешенных оценок качества жизни варианта проекта  $i$ , полученные экспертом  $j$ . После нормализации оценок вычисляются  $B_{ij}$ . Затем аналогично проводятся все вычисления и получаются  $\bar{B}_i^t$  – обобщенная оценка уровня социальной значимости  $i$ -го варианта проекта.

Методы экспертных оценок, основанные на качественных суждениях, имеют серьезные недостатки в силу своей субъективности. Анализ подобных экспертиз показывает, что использование качественных данных часто искажает ожидаемую вероятность события за счет увеличения значимости часто повторяющихся и недавних событий, более впечатляющих эффектов. С этим следует считаться при использовании экспертных оценок.

*Экспертный отбор вариантов проекта на базе использования метода иерархий Саати*

Будем рассматривать следующие критерии выбора вариантов проекта: повышение благосостояния населения, социальной и экономической стабильности в регионе; повышение уровня занятости; насыщение региона товарами создаваемого предприятия; охрана окружающей среды; удовлетворение потребностей в дошкольных учреждениях, квалифицированной медицинской помощи, жилье.

Выбор наиболее приоритетных вариантов проекта предлагается осуществлять с помощью метода иерархий Саати [17]. При установлении важности элементов иерархии  $a_{ij}$  используем шкалу отношений (табл. 3.5.1), которая позволяет при попарном сравнении численно оценить степень предпочтения элементов иерархии друг перед другом.

Табл. 3.5.3 содержит пример применения метода попарных сравнений критериев по проекту строительства супермаркета «Родник», г. Челябинск.

Таблица 3.5.3

Матрица попарных сравнений критериев А

Критерии	Повышение благосостояния	Повышение уровня занятости	Насыщение региона товарами	Охрана окружающей среды	Удовлетворение потребностей в жилье
повышение благосостояния	1	3	3	2	3
повышение уровня занятости	1/3	1	1/3	3	5
насыщение региона товарами	1/3	3	1	5	5
охрана окружающей среды	1/2	1/3	1/5	1	5
удовлетворение потребностей в жилье	1/3	1/5	1/5	1/5	1

При формировании вектора приоритетов критериев нормализуется матрица А, делением ее элементов на сумму элементов каждого столбца.

$$N_A = \begin{pmatrix} 0.40 & 0.40 & 0.63 & 0.18 & 0.16 \\ 0.13 & 0.13 & 0.07 & 0.27 & 0.26 \\ 0.13 & 0.40 & 0.21 & 0.44 & 0.26 \\ 0.13 & 0.04 & 0.04 & 0.09 & 0.26 \\ 0.21 & 0.03 & 0.04 & 0.02 & 0.06 \end{pmatrix}$$

Затем вычисляются компоненты вектора приоритетов  $W^E$  как среднеарифметические значения элементов строк нормализованной матрицы.

$$W^E = (0.35 \quad 0.17 \quad 0.23 \quad 0.11 \quad 0.08). \quad (3.5.6)$$

Самым приоритетным на данном проекте оказалось «повышение благосостояния» (0, 35), потом «насыщение региона товарами» (0, 23), затем «повышение уровня занятости», следом «охрана окружающей среды» и на последнем месте «удовлетворение потребностей в жилье».

После этого по каждому критерию формируется матрица попарных сравнений альтернатив выполнения проекта, и вычисляются вектора их приоритетов. Данные вектора скалярно умножаются на полученный вектор приоритетов критериев (3.5.6) и в результате получаем вектор приоритетов вариантов проекта  $\{A_i\}$ . При длительном сроке реализации сложного

проекта данную процедуру необходимо проводить отдельно по каждому году, получая оценки  $A_i^t$ .

*Математическая модель, максимизирующая объем собираемых налогов*

Пусть нам известно:  $N_t$  – план налогообложения по годам. Известна также  $V_t^k$  – прибыль от реализации финансовых этапов варианта  $k$  реализации проекта, прогноз которой разрабатывается руководителем проекта (его командой, генконтрактором). Команда проекта определяет совместно с заказчиком и регулирующими органами перечень положительных и отрицательных сторон реализации проекта (с начала его разработки до завершения и последующей эксплуатации) и оценивает их экспертно по каждому варианту реализации.

К положительным сторонам (аспектам) реализации проекта ( $a_q^+$ ) относятся: выпуск конкурентоспособной продукции, привлекательной по качеству и ценам; создание новых рабочих мест; повышение наполняемости бюджета за счет производства новой продукции; улучшение транспортной инфраструктуры территории; решение определенных социальных вопросов.

К отрицательным аспектам реализации проекта ( $a_q^-$ ) относятся: невыполнение санитарно-эпидемиологических требований; загрязнение ландшафта; ухудшение экологической обстановки; ухудшение историко-архитектурной привлекательности местности.

Оценки вышеперечисленных аспектов существенным образом зависят от финансовых результатов этапов выполнения вариантов проекта.

Математическая модель задачи выглядит следующим образом: найти такой вариант выполнения проекта  $k_{\text{эф}}$ , который обеспечивает:

$$n_t V_t^{k_{\text{эф}}} \geq N_t, \quad (3.5.7)$$

$$\sum_{q=1}^5 a_q^+ (V_t^{k_{\text{эф}}}) - \sum_{q=1}^3 a_q^- (V_t^{k_{\text{эф}}}) \geq \sum_{q=1}^5 a_q^+ (V_t^k) - \sum_{q=1}^3 a_q^- (V_t^k), \forall k. \quad (3.5.8)$$

Модель предназначена для оптимизации выгод и потерь в регионе, обеспечивая социальные и экологические требования и ограничения по налогообложению, т.е. способствует выбору такого варианта реализации проекта, который обеспечивает выполнение плана налогообложения ( $n_t$  – годовая ставка) при максимальной объективной оценке положительных и отрицательных аспектов его реализации.

*Многокритериальная математическая модель, обеспечивающая минимизацию экологического риска, повышение качества жизни и максимизацию налогов*

Пусть нам заданы возможные объемы инвестирования проекта  $Q = \sum_{t=0}^T Q^t$  по годам  $t \in [0, T]$ . Эти средства инвестор может вложить в  $k$ -й вариант проекта, требующий в период  $t$  объем финансирования  $\Phi_k^t$ . При-

быль от выполнения варианта проекта  $k$  на конец  $t$ -го периода составляет  $V_k^t$ , ставка налогообложения  $n_k$ , оценка экологического риска  $\bar{A}_k^t$ , а прогнозируемая оценка степени социальной значимости проекта составляет  $\bar{B}_k^t$ .

Необходимо найти вариант выполнения проекта, обеспечивающий максимальный объем налогов при минимально допустимых значениях уровня социальной значимости проекта и экологического риска.

Выбор такого варианта реализации проекта представляет собой следующую трехкритериальную задачу целочисленного программирования с булевыми переменными. Требуется найти:

$$x_k = \begin{cases} 1, & \text{если выбирается } k\text{-й вариант проекта,} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.5.9)$$

при ограничениях:

$$\sum_{k=1}^N \Phi_k^t \cdot x_k \leq Q^t, \forall t \in [0, T]. \quad (3.5.10)$$

Целевые функции:

1) максимизация ожидаемого объема налогов:

$$F_1 = \sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^N x_k \cdot n_k \cdot V_k^t \right) (1+d)^{-t} \rightarrow \max; \quad (3.5.11)$$

2) минимизация экологического риска:

$$F_2 = \sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^N x_k \cdot \bar{A}_k^t \right) (1+d)^{-t} \rightarrow \min; \quad (3.5.12)$$

3) повышение качества жизни:

$$F_3 = \sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^N x_k \cdot \bar{B}_k^t \right) (1+d)^{-t} \rightarrow \max; \quad (3.5.13)$$

Оценки экологического риска  $\bar{A}_k^t$  варианта проекта  $k$ , реализуемого в период  $t$  с инвестициями  $V_k^t$ , формируются алгоритмом, описанным в п.3.5.2. Оценки уровня социальной значимости проекта  $\bar{B}_k^t$  рассчитываются в п.3.5.3. Эти оценки можно заменить обобщенными оценками  $A_k^t$ , сформированными в п.3.5.2. Коэффициент дисконтирования  $d$  берется как минимально допустимый уровень доходности государственных инвестиций. Его применение для второй и третьей целевых функций служит для меры эквивалентности значений риска и уровня социальной значимости проекта при разных временных периодах.

Решение поставленной задачи предлагается осуществлять методом последовательных уступок, подробно описанном выше.

Предложенные постановки задач для Регулирующих и надзорных органов могут служить основой при разработке многовариантной системы управления проектами. При этом вышеприведенные математические модели реализуют многие компетенции Регулирующих органов при выполнении проекта. Сформированные в задачах 3.5.2 и 3.5.3 оценки уровня социальной значимости проекта и экологических рисков, используемые в задаче 3.5.4, могут быть использованы в ряде других моделей, описание которых приведено выше, при выполнении государственными органами многофункциональных ролей.



### Глава 3.6. Модели и механизмы управления проектами для коммерческой службы

Реализуемые коммерческие проекты ставят цель получить финансовую выгоду. Инвестор решает принять участие в проекте, основываясь на бизнес-плане, и имеет целью извлечение прибыли. Команда управления проектом вместе с генеральным подрядчиком и поставщиком реализует проект, создавая конечный продукт в соответствии с требованиями заказчика и обеспечивая получение инвестором прибыли. Эти роли в управлении проектами хорошо изучены и в достаточной степени описаны [6, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16]. Но для получения прибыли требуется обеспечить фактическое поступление денежных потоков путем продажи создаваемого продукта или другого способа его реализации (например, сдача в аренду построенного объекта недвижимости). Продажа созданного продукта – сфера деятельности коммерческой службы, обеспечивающая прибыльность проекта, что является важнейшим критерием успешности. Несмотря на это, в существующих методологиях УП мало внимания уделяется компетенциям, инструментам и методам, используемым коммерческой службой для эффективной реализации своих задач.

Коммерческая служба – это организация, которая отвечает за реализацию конечного продукта проекта его потребителю и обеспечивает поступление выручки от этой реализации.

Рассмотрим далее коммерческую службу на примере строительных проектов и девелопмента в связи с тем, что большинство проектов, реализуемых в этой области, основной своей целью имеют получение прибыли. Роль коммерческой службы в сфере недвижимости выполняют как отдельные подразделения в структуре материнской компании, так и самостоятельные организации.

#### *Назначение коммерческой службы*

Профессиональная коммерческая служба сегодня играет очень важную роль. Большинство подобных компаний функционируют успешно на рынке более 15 лет. Накопленный опыт в проведении коммерческих сделок любой сложности и наличие большой клиентской базы являются гарантией их надежности. Такие компании на высоком уровне в сжатые сроки предоставляют полный пакет услуг – от поиска клиентов до юридического сопровождения заключенной сделки.

Назначение и цель коммерческой службы – обеспечение притока денежных средств. В зависимости от типа создаваемого объекта это может быть: продажа квартир в объектах жилой недвижимости; продажа офисных и торговых площадей коммерческой недвижимости; сдача в аренду офисных и торговых площадей и т.д.

При этом все вышеперечисленное может реализовываться в секторе нового строительства и на рынке вторичной недвижимости.

Для достижения поставленной цели коммерческая служба выполняет следующие задачи:

- разрабатывает и проводит маркетинговые мероприятия, обеспечивающие поиск и привлечение клиентов;
- производит оценку рынка, учитывая платежеспособность населения, количество потенциальных покупателей по видам объектов недвижимости;
- осуществляет прогнозирование доходов и прибыли;
- заключает договора с клиентами;
- отслеживает поступления денежных средств по действующим договорам;
- решает проблемы клиентов и работает с рекламациями.

Главной задачей является получение запланированной выручки в привязке к графику реализации проекта и, как следствие, обеспечение максимальной прибыли проекта.

Используемая входная информация: бизнес-план проекта; план помесичных продаж, включающий номенклатуру подлежащих реализации результатов проекта; бюджет проекта; укрупненный сетевой график; юридическое обеспечение (договора и другие документы); план по вехам.

Коммерческая служба должна иметь эффективные математические модели и методы для оперативного управления вышеперечисленными задачами.

*Математическая модель, описывающая зависимость выполнения плана продаж от характеристик проекта и графика его реализации*

В модели анализируется и прогнозируется показатель качества  $Y^k$ , в качестве которого берется процент выполнения плана продаж за  $k$  месяцев после срока сдачи проекта ( $k = 0, \dots, K$ ).

Входной информацией служат статистические данные о выполненных  $N$  проектах  $x_{pi}$  и показатели качества  $Y_p^k$  ( $p = 1, \dots, N$ ). Здесь  $i = 1, \dots, n$  – номер фактора (характеристика проекта), проекты группируются по типам, каждый тип может иметь свой набор факторов.

Например, в жилищном строительстве следующий набор факторов: число 4-х комнатных квартир; число 3-х комнатных квартир; число 2-х комнатных квартир; число 1-х комнатных квартир; стоимость  $1\text{м}^2$ ; этажность; качество инфраструктуры и благоустройства прилегающей территории (определяется экспертно по 5-бальной системе); расстояние до метро (при наличии); расстояние до ближайшей остановки общественного транспорта; затраты на рекламу проекта; отклонение фактического срока завершения объекта от планового.

На базе приведенной выше информации строится регрессионная линейная (аддитивная) модель зависимости выполнения плана продаж от характеристик проекта в виде:

$$Y^k = a_0 + a_1 \times X_1 + \dots + a_n \times X_n, \quad (3.6.1)$$

где  $a_i$  – это коэффициенты регрессии, которые показывают степень влияния  $i$ -го фактора на показатель качества. Изменяя значение фактора  $i$  на единицу (единицу измерения данного фактора) значение  $Y^k$  меняется на  $a_i$ .

При построении модели определяются характеристики проекта (факторы), оказывающие наибольшее влияние на анализируемый показатель качества, при этом каждому  $k$  может соответствовать свой набор факторов и, соответственно, коэффициентов регрессии. Отбираются факторы посредством анализа коэффициентов корреляции  $r_{ij}$  каждой пары факторов  $X_i, X_j$  в уравнении (3.6.1). Коэффициенты корреляции факторов показывают их связь между собой. При  $|r_{ij}| \geq 0.8$  связь достаточно сильная, использование одного из факторов нецелесообразно, и он удаляется из дальнейшего анализа. Кроме того, исключаются факторы, имеющие низкое качество коэффициентов регрессии, которое определяется по значению  $t$ -статистики меньше 1, 5 (по модулю). В итоге получается некоторое множество факторов, которые независимы и качественно вычислены.

Полученную модель можно использовать в двух направлениях:

1. Повышать качество выполнения плана продаж, изменяя (по возможности) значения характеристик (факторов) проекта (увеличивать  $i$ -й фактор при  $a_i > 0$ , и, соответственно, уменьшать при  $a_i < 0$ );

2. Прогнозировать ход выполнения плана продаж после сдачи проекта в течение  $k$  месяцев.

Строить нелинейную (мультипликативную) модель зависимости выполнения плана продаж от характеристик проекта, т.е. регрессии вида

$$Y^k = a_0 X_1^{a_1} X_2^{a_2} \times \dots \times X_n^{a_n} \quad (3.6.2)$$

нецелесообразно в данном случае, так как здесь постоянные показатели степени  $a_i$  являются коэффициентами эластичности. Они соответствуют проценту изменения анализируемого показателя  $Y^k$  при изменении  $i$ -го фактора на 1 процент. Однако на практике статистические данные о выполнении плана продаж и характеристиках жилищного строительства показывают сильную зависимость коэффициентов эластичности показателей  $Y^k$  от величины факторов. Поэтому для жилищного строительства рекомендуется строить регрессионную модель (3.6.1). При наличии постоянных коэффициентов эластичности в статистических данных о характеристиках каких-либо других типов проектов необходимо строить регрессии в соответствие с (3.6.2).

*Математическая модель, обеспечивающая оценку рынка жилищного строительства*

При оценке рынка применяется также регрессионная модель вида (3.6.1) или (3.6.2). При этом в данном пункте для примера используется статистическая информация, характерная для рынка жилищного строительства Челябинской области. Построенная таким образом модель и соот-

ветствующая методика может быть использована в других регионах РФ, кроме Москвы, характеристики рынка в которой определяются спецификой столицы.

При оценке рынка жилья в определенном районе компания руководствуется следующими показателями: количество потенциальных клиентов; географическое положение; инфраструктура; ожидаемая прибыль; наличие конкурентов в регионе и пр.

При создании методики оценки рынка жилищного строительства мы руководствовались следующими предпосылками: необходимо оперировать показателями, которые поддаются измерению и сопоставлению и отражают основные социально-экономические показатели региона; необходимо пользоваться достоверными и доступными для пользования источниками данных, не требовать дополнительных исследований для получения информации, что упрощает работу с моделью и экономит средства компании.

Таким образом, за основу при создании данной методики взят «Всероссийский статистический сборник» и статистический сборник «Города Челябинской области».

1-й сборник включает подробную статистическую информацию, в том числе:

*Население:* численность, плотность населения, естественный прирост, убыль, количество родившихся, количество умерших, число браков, число разводов.

*Труд:* численность официально работающих, численность незанятых граждан на производстве, из них число признанных безработными.

*Охрана окружающей среды:* количество загрязняющих веществ в отходах производства, объем сброса зараженных сточных вод.

*Социальное обеспечение и уровень жизни населения:* среднемесячная начисленная заработная плата, средний размер месячных пенсий, численность пенсионеров, количество дошкольных учреждений и детей в них, количество дневных общеобразовательных учреждений и учащихся в них, число средних специальных учебных заведений и студентов в них, число высших учебных заведений и студентов в них, число врачей всех специальностей, число среднего медицинского персонала, количество больничных учреждений, количество больничных коек, количество амбулаторно-поликлинических учреждений, библиотечный фонд, количество общедоступных библиотек, число культурно-досуговых учреждений, число музеев.

*Правонарушения:* количество зарегистрированных преступлений, количество выявленных лиц, совершивших преступления.

*Промышленность:* индекс промышленного производства, объем промышленной продукции, численность промышленно-производственного персонала.

*Жилищный фонд:* среднее количество м<sup>2</sup> на одного жителя.

*Производство промышленной продукции*: сталь, чугун, цельномолочная продукция, цемент.

*Торговля и платные услуги населению*: оборот общественного питания, оборот розничной торговли, объем платных услуг населению.

*Строительство*: ввод жилых домов, в том числе индивидуальными застройщиками.

*Транспорт и связь*: объем перевозок грузов автотранспортными организациями, объем перевозок пассажиров автотранспортными организациями, объем телефонизации населения.

*Инвестиции*: инвестиции в жилищное строительство, инвестиции в основной капитал.

*Финансы*: финансовые итоги деятельности предприятий и организаций, процент убыточных организаций, общая сумма убытков.

Из этого множества показателей были выбраны значащие и независимые (коэффициенты корреляции  $< 0,85$ ), дающие достоверную характеристику анализируемого региона: год; объемы частного сектора (число домов); население – потенциальное количество клиентов; заработная плата – потенциальная величина платежей; число автомобилей; обеспеченность жильем, м<sup>2</sup>/чел.

Мы ограничились шестью показателями в связи с тем, что многие факторы оказались взаимозависимыми, при этом оставленные факторы дали высокий коэффициент достоверности корреляционной модели. Кроме того, нам в принципе было необходимо убедиться в эффективности выбранного нами метода оценки и прогнозирования рынка жилищного строительства. При использовании полученной методики в других регионах РФ она может быть адаптирована и усовершенствована.

В качестве моделируемого показателя выбран «ввод в действие жилых домов», который позволяет строительной компании произвести оценку ее развития в заданном регионе.

Модель сформирована на информационной базе шести городов – Южноуральск (ЮЖУ), Троицк, Златоуст, Миасс, Катав-Ивановск (К-И), Усть-Катав (У-К), где выбранная для примера Челябинская строительная компания Стройком вела жилищное строительство в 2015, 2016 и 2017 годах. В табл. 3.6.1 представлены выбранные показатели объектов исследования по годам.

Регрессионная модель для показателя  $Y$  – «ввод в эксплуатацию жилых домов» с переменными  $x_1, \dots, x_6$  построена с использованием пакета Excel Анализ данных, функция «Регрессия».

Получено:

$$Y = -6628926,2 + 3324,5x_1 - 9,09x_2 + 266,6x_3 + 5,8x_4 - 0,2x_5 - 6117,4x_6. \quad (3.6.3)$$

Коэффициенты регрессии в полученном уравнении показывают, что положительное влияние на результат оказывает год, численность населения и зарплата, что довольно естественно.

Отрицательные коэффициенты регрессии у факторов «объемы частного сектора» и «обеспеченность жильем» также вполне логичны – обходятся тем, что есть. Отрицательное влияние количества автомобилей объясняется тем, что невысокие доходы не позволяют людям приобретать автомобиль и в то же время улучшать жилищные условия.

Полученное значение коэффициента детерминации близко к единице (0.97), таким образом, полученная модель адекватно отражает зависимость анализируемого показателя от выбранных факторов. Сформированную регрессию теперь можно использовать для прогнозирования объемов жилищного строительства в уже освоенных городах, а также для анализа развития рынка жилья в новых регионах.

Таблица 3.6.1

Социально-экономические характеристики городов

Район	Год ( $x_1$ )	Объемы частного сектора, кол-во ( $x_2$ )	Население, тыс.чел. ( $x_3$ )	Зар. плата, руб. ( $x_4$ )	Число автомобилей, шт. ( $x_5$ )	Обеспеченность жильем, м <sup>2</sup> /чел. ( $x_6$ )	Ввод в действие жилых домов, м <sup>2</sup> (Y)
ЮжУ	2015	2098	39, 400	5063	13200	10, 25	6345
	2016	2106	39, 600	6854	14546	11, 13	2086
	2017	2217	39, 500	8106	15034	12, 57	7241
Троицк	2015	2957	83, 900	5459	29062	10, 23	12286
	2016	2861	83, 500	6589	28178	11, 11	11861
	2017	2862	83, 000	9155	29119	12, 33	21420
Златоуст	2015	3823	196, 600	5114	29230	11, 5	17917
	2016	3722	195, 200	5854	30185	12, 98	21072
	2017	3651	193, 900	7079	31746	12, 56	36609
Миасс	2015	2521	171, 700	5206	53382	11, 79	17010
	2016	2449	170, 400	6164	53586	13, 14	20078
	2017	2776	169, 000	7420	52497	12, 54	33303
К-И	2015	1135	20, 300	4883	13483	10, 68	2346
	2016	1336	20, 000	5922	13161	12, 2	1936
	2017	1374	19, 800	6812	13226	12, 41	4252
У-К	2015	797	30, 100	4966	12500	11, 74	1406
	2016	1192	29, 800	5039	12531	12, 5	1992
	2017	1227	29, 400	6813	12849	12, 81	2643

*Анализ потенциальных городов для жилищного строительства*

Для исследований были взяты относительно крупные города Челябинской области, в которых выбранная строительная компания пока не производит работ. Это Чебаркуль, Кыштым и Сатка.

Для каждого города на базе статистических данных за 2001–2017г.г. были построены линейные регрессии (тренды) зависимости каждого отобранного фактора от времени t. Используя полученные тренды, были осу-

существлены прогнозы значений социально-экономических факторов на следующие 2 года. Результаты представлены в табл. 3.6.2–3.6.4.

Таблица 3.6.2

Прогноз значений социально-экономических факторов –  
Чебаркуль

Год	Население, $x_2$ , тыс.чел.	Част. сектор, кол-во. ( $x_3$ )	Зар. плата, $x_4$ , руб.	Автомобили, $x_5$ , шт.	Обеспеченность жильем, м <sup>2</sup> /чел. ( $x_6$ )
2018	39, 480	3656	10236	16150	15, 97
2019	38, 320	3947	11113	16833	16, 47

Таблица 3.6.3

Прогноз значений социально-экономических факторов —  
Кыштым

Год	Население, $x_2$ , тыс.чел.	Част. сектор, кол-во. ( $x_3$ )	Зар. плата, $x_4$ , руб.	Автомобили, $x_5$ , шт.	Обеспеченность жильем, м <sup>2</sup> /чел. ( $x_6$ )
2018	31, 660	3030	9010	16435	16, 34
2019	29, 540	3321	9681	17217	17, 44

Таблица 3.6.4

Прогноз значений социально-экономических факторов –  
Сатка

Год	Население, $x_2$ , тыс. чел.	Част. сектор, кол-во ( $x_3$ )	Зар. плата, $x_4$ , руб.	Автомобили, $x_5$ , шт.	Обеспеченность жильем, м <sup>2</sup> /чел. ( $x_6$ )
2018	48, 160	3912	9988	13691	13, 34
2019	47, 980	4231	10760	13620	13, 68

На основании полученных прогнозов по формуле (3.6.3) рассчитан для выбранных городов прогноз значений результирующего показателя (Y) и помещен в табл. 3.6.5.

Таблица 3.6.5

Прогноз значений для выбранных городов  
результирующего показателя Y (по годам), м<sup>2</sup>

Год	Чебаркуль	Кыштым	Сатка
2018	1488.38	6325.39	11385.51
2019	1194.15	6242.79	11230.27

Полученный прогноз показывает абсолютную перспективность города Сатка для развертывания жилищного строительства, второе место занял Кыштым, Чебаркуль замыкает анализируемый перечень с весьма скромным результатом.

### *Математическая модель оптимизации характеристик проекта жилищного строительства*

Входной информацией модели являются границы допустимых значений параметров проекта и сформированная многофакторная регрессия. Эти границы могут иметь технологический, технический, экономический, социальный и пр. характер. Например, ассортимент квартир в доме, его этажность определяются техническими, экономическими и социальными причинами; стоимость  $1\text{ м}^2$  – экономическими и социальными причинами и т.д. Имеем ограничения:

$$a_i \leq x_i \leq b_i \quad (i = 1, \dots, n). \quad (3.6.4)$$

Вербальная постановка задачи:

Найти такие характеристики проекта  $\{x_i\}$ , которые удовлетворяют ограничениям (3.6.4) и доставляют максимум приведенному потоку платежей от реализации жилья.

Многофакторная регрессия (3.6.1), построенная выше, позволяет получать  $Y^k$  – долю продаж квартир в  $k$ -й месяц после сдачи дома, поэтому член потока платежей месяца  $k$  будет равен  $(Y^k - Y^{k-1})V$ , где  $V$  – стоимость всего дома. Таким образом, математическая модель задачи имеет следующую целевую функцию:

$$P = Y^0 + \sum_{k=1}^n (Y^k - Y^{k-1})(1 + d)^{-k} \rightarrow \max. \quad (3.6.5)$$

Здесь  $d$  – ставка дисконтирования, характеризующая необходимый уровень эффективности вложений в жилищное строительство.  $V$  является константой, не влияет на результат, поэтому она удалена из функции (3.6.5).

Характеристики проекта  $\{x_i\}$ , определенные таким образом, могут служить основой для выработки мероприятий, повышающих экономическую эффективность. Предложения от коммерческой службы по изменению технологических и технических характеристик имеют рекомендательный характер, те же изменения, реализация которых может быть произведена самой коммерческой службой – маркетинговые работы, например, являются планом ее действий.

### **Библиографический список к части 3**

1. Бажин, И.И. Антикоррупционные механизмы выбора поставщика в управлении ресурсным обеспечением / И.И. Бажин, Н.М.Барина, В.В. Сысоев. // «Руководитель бюджетной организации», 2011. – № 8. – С.45-58.
2. Бажин, И.И. Управление процессом закупок методом многокритериальной оценки выбора поставщика / И.И.Бажин, Н.М.Барина, В.В. Сысоев. // Проблемы теории и практики управления. 2006. – № 8. – С. 62– 70.
3. Баркалов, С.А. Методы агрегирования в управлении проектами / С.А.Баркалов, В.Н.Бурков, Н.М. Гилязов. – М.: ИПУ РАН, 1999. 55с.



4. Боди, З. Принципы инвестиций / З.Боди, А.Кейн, А.Маркус. – М.: Вильямс, 2008. 982с.
5. Голенко-Гинзбург, Д. И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками / Д. И. Голенко-Гинзбург. – Воронеж: «Научная книга», 2010. – 283с.
6. Гельруд, Я.Д. Управление проектами: методы, модели, системы: монография / Я.Д. Гельруд, О.В. Логиновский; под редакцией доктора технических наук, профессора А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 331 с.
7. Дмитриев, Д.В. Управление проектами: практ. рук-во / Д.В. Дмитриев, З.М. Дмитриева, М.Ю. Рыбаков и др. – М.: Юркнига, 2003. – 240 с.
8. Гельруд, Я.Д. Обобщенные стохастические сетевые модели для управления комплексными проектами/ Я.Д.Гельруд // Вестник НГУ. Серия: математика, механика, информатика. – 2010. – №4. – С. 36-51.
9. Гельруд, Я.Д. Управление проектами: методы, модели, системы: монография /Я.Д. Гельруд, О.В. Логиновский; под ред. д-ра техн. наук проф. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 330 с.
10. Ильин, А.В. Интерактивный преобразователь ресурсов с изменяемыми правилами поведения / А.В.Ильин, В.Д. Ильин. // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2004. – №2. – С. 68– 82.
11. Йордон, Э. Управление сложными интернет-проектами / Э. Йордон. – М.: «Лори», 2002. – 326с.
12. Колосова, Е.В. Методика освоенного объема в оперативном управлении проектами / Е.В. Колосова, Д.А. Новиков, А.В. Цветков. – М.: Апостроф, 2001. – 152с.
13. Кэмпбелл, К.А. Управление проектом на одной странице / К.А. Кэмпбелл. – М.: Вильямс, 2009. – 160 с.
14. Лотов, А.В. Теория и методы многокритериальной оптимизации / А.В.Лотов, И.И. Поспелова. – М: Макс Пресс, 2008. – 197с.
15. Михеев, В.Н. Живой менеджмент проектов / В.Н. Михеев. – М.: Эксмо, 2007. – 480с.
16. Позняков, В.В. Управление проектами для топ-менеджеров / В.В. Позняков. // Управление проектами и программами. – 2012. – № 3. – С.45–53.
17. Саати, Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т.Л. Саати. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.
18. Тернер, Дж.Р. Руководство по проектно-ориентированному управлению. / Дж. Р.Тернер; Пер. с англ. под общей ред. Воропаева В.И. – М.: Издательский дом Гребенникова, 2007. – 552с.
19. Топка, В. В. Минимизация времени и стоимости при ограничении на показатель надежности в дизъюнктивной модели проекта / В. В. Топка. // Автоматика и телемеханика. –2012. – № 7. – С.86–97.

20. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: монография/ О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков, и др.; под ред. д.т.н., проф. О.В. Логиновского, д.т.н., проф. А.А. Максимова. – М.: ИНФРА–М, 2017. – 410 с.

21. Korennaya, K.A. Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations. / K.A. Korennaya, O.V Loginovsky, A.A.Maksimov, A.V. Zimin // Under editorship of D. Sc., prof. Shestakov A.L. – Kostanay : State University, Kostanay, 2014. 227 p.

22. Seung Heon Han. Analyzing Schedule Delay of Mega Project: Lessons Learned From Korea Train Express / Seung Heon Han [et al] // IEEE Transactions on Eng. Management. 2009. Vol. 56, N. 2 (May).

## ЧАСТЬ 4. ГИБКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

### Глава 4.1. Методологии гибкого управления проектами

С ростом числа проектов, находящихся в управлении, использование классических методов приводит к росту затрат, идущих непосредственно на осуществление управления. Впервые эти затруднения испытали ИТ-компании, занимающиеся разработкой программного обеспечения. Большое количество доработок и замечаний, выявленных в ходе реализации проектов, приводило к постоянному их перепланированию, что часто парализовывало работу.

Если анализировать точность прогнозов, то на стадии первоначальной концепции неопределенность может колебаться в диапазоне 60–160% от реальных сроков (рис. 4.1.1), и лишь по мере приближения к окончанию проекта неопределенность значительно сокращается [4].

Если оценка и планирование такая трудная задача, то возникает вопрос: «Можно ли отказаться от них?». Одним из возможных решений данной проблемы был отказ от «классического планирования» и переход к более гибким схемам управления проектами, например, за счет сокращения количества проектов, одновременно находящихся в работе, а также за счет сокращения размера самих проектов (посредством деления их при необходимости на подпроекты). Эти мероприятия позволяли сокращать время в течение которого проект находится в работе и исключать операции, связанные с корректировкой плана, так как работа по скорректированному плану зачастую просто превращалась в новый проект [3]. Общее движение в этом направлении привело к появлению идеологии *гибкого управления*, которое в области разработки программного обеспечения получило в 2011 году название Agile [14].

По сути, Agile не является методологией, а представляет собой набор принципов [9, 13], которыми следует руководствоваться при «гибкой разработке». Данные принципы были оформлены в документе Манифест Agile (<http://agilemanifesto.org>):

- люди и взаимодействие важнее процессов и инструментов;
- работающий продукт важнее исчерпывающей документации;
- сотрудничество с заказчиком важнее согласования условий контракта;
- готовность к изменениям важнее следования первоначальному плану».

Разработчики Agile-манифеста не отрицают важности того, что записано справа, тем не менее, большей ценностью считают то, что записано слева.

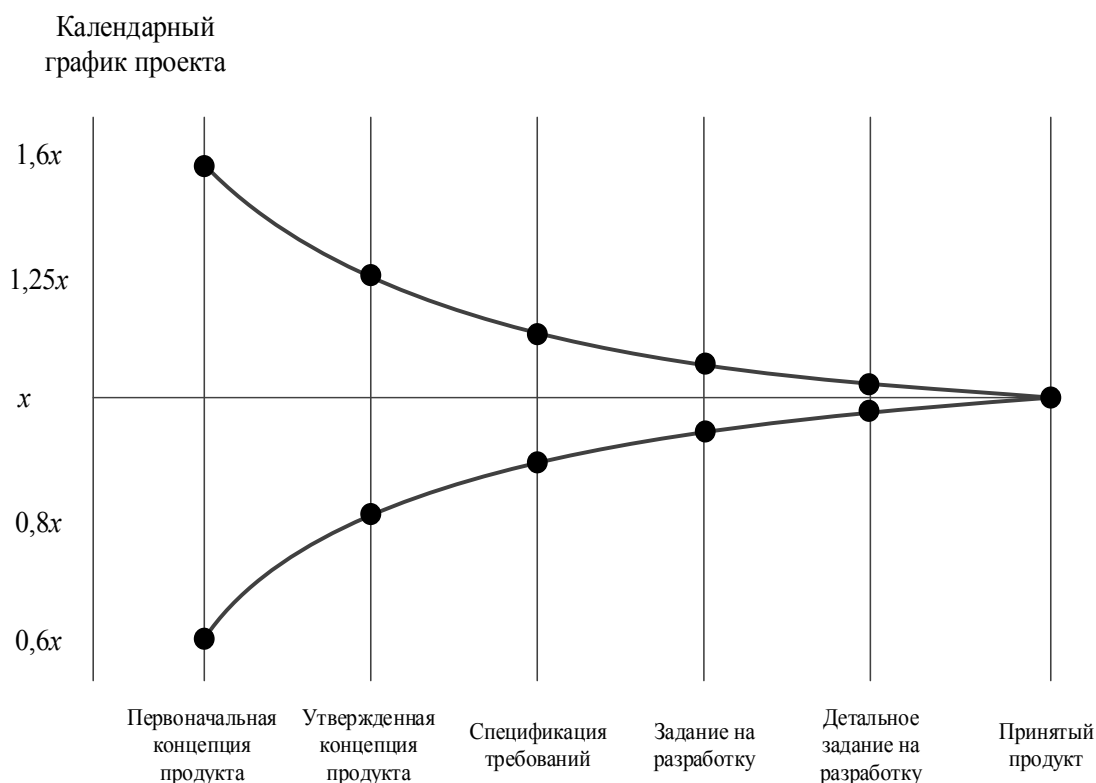


Рис. 4.1.1. Неопределенность на различных стадиях проекта (конус неопределенности)

В рамках подхода Agile на текущий момент оформилось множество конкретных методологий: Agile Modeling (AM) (<http://www.agilemodeling.com>), Agile Unified Process (AUP) ([https://www.theregister.co.uk/2008/02/28/agile\\_crossing\\_chasm](https://www.theregister.co.uk/2008/02/28/agile_crossing_chasm)), Agile Data Method (ADM) (<http://mahamba.com/ru/gibkaya-metodologiya-razrabotki-agile>), Dynamic Systems Development Method (DSDM) (<http://www.dsdm.org>), Essential Unified Process (EssUP), Extreme programming (XP) [1, 2], Feature driven development (FDD) [12], Getting Real (GR), OpenUP (OUP) (<https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/kroll/index.html>), lean software development [7], Scrum [5, 8].

На сайте [explore.versionone.com](http://explore.versionone.com) публикуется ежегодная статистика по использованию методологий Agile в мире. В настоящий момент наиболее популярной методологией является scrum (<https://explore.versionone.com>). Остальные методологии чаще всего используются совместно со scrum как источник отдельных приемов и методов.

Слово scrum («схватка») заимствовано Джеффом Сазерлендом и Кеном Швабером из регби [8] и обозначает метод командной игры, при которой команда, завладев мячом, начинает двигаться по полю как единое целое, передавая мяч внутри команды. Впервые данная аналогия была высказана в статье японских исследователей [11], которые проанализировали деятельность таких крупнейших компаний, как Honda, Fuji-Xerox, 3M,

Hewlett-Packard. Они пришли к выводу, что ведущие компании мира отказываются от тщательного линейного поэтапного планирования и контроля разработок новых продуктов и переходят к методам параллельной работы команд с достаточно большой автономией принятия решений разработчиками.

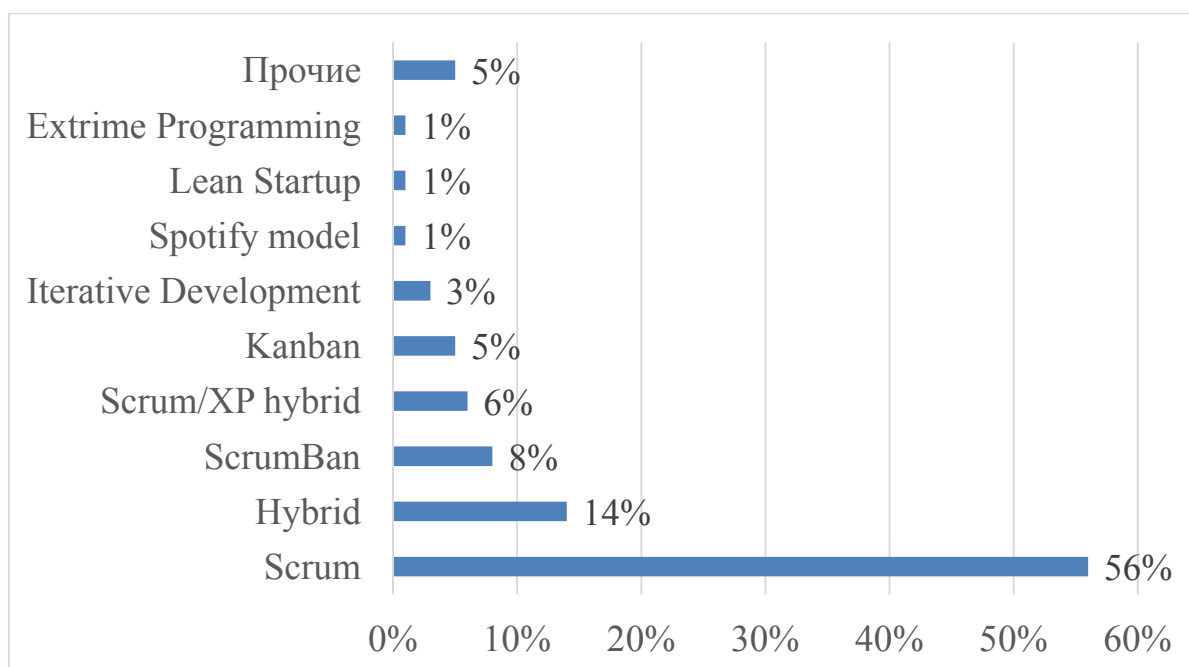


Рис. 4.1.2. Популярность различных гибких методологий в 2017 г.

Идея scrum в управлении проектами очень проста: вместо того, чтобы тратить громадное количество времени на планирование работ, лучше как можно чаще проверять ход работ и при необходимости корректировать работу команды. Это достигается за счет деления проекта на маленькие автономные блоки. После завершения каждого блока можно оценить его результат. Данные блоки в scrum носят название *спринты* (подчеркивается их скоротечность). Спринты чаще всего имеют конкретные промежутки времени – от одной до четырех недель. Общая схема управления проектом на базе методологии scrum представлена на рис. 4.1.3.

Основным рабочим звеном является *команда проекта*, подобранная из различных специалистов, которые необходимы для выполнения задач проекта. Один из членов команды (*скрам-мастер*) отвечает за соблюдение процедур и правил, предписываемых методологией Scrum.

Особенностью ИТ-проектов является то, что концепция конечного продукта чаще всего представлена в виде набора требований, которые формируют *беклог продукта* – базу требований к конечному продукту. За формирование беклога продукта отвечает *владелец продукта*, он же взаимодействует со всеми заинтересованными сторонами. Из беклога продукта

формируется *беклог спринта*, т.е. выборка требований, из которой производится формирование текущего спринта.

При такой организации команда проекта работает над небольшим количеством требований, собранных в спринт, и по мере завершения очередного спринта в работу берется новый спринт, сформированный из беклога. В связи с небольшой длительностью каждого спринта команда может очень быстро реагировать на изменения во внешней среде за счет процедуры отбора требований в спринт. Для этого в конце каждого спринта проводится демонстрация измененного продукта в рамках совещания, называемого *обзором спринта*, с участием команды проекта и владельца продукта. В ходе таких совещаний часто меняются требования к продукту, что отражается в изменении беклога и влияет на состав следующего спринта. Еще один вид совещания, проводимый через некоторое время после обзора спринта, называется *ретроспективой*. Целью ретроспективы является получения обратной связи от владельца продукта по процессу непосредственной работы команды, а также решение возможных организационных проблем, с которыми сталкиваются разработчики в ходе своей работы.

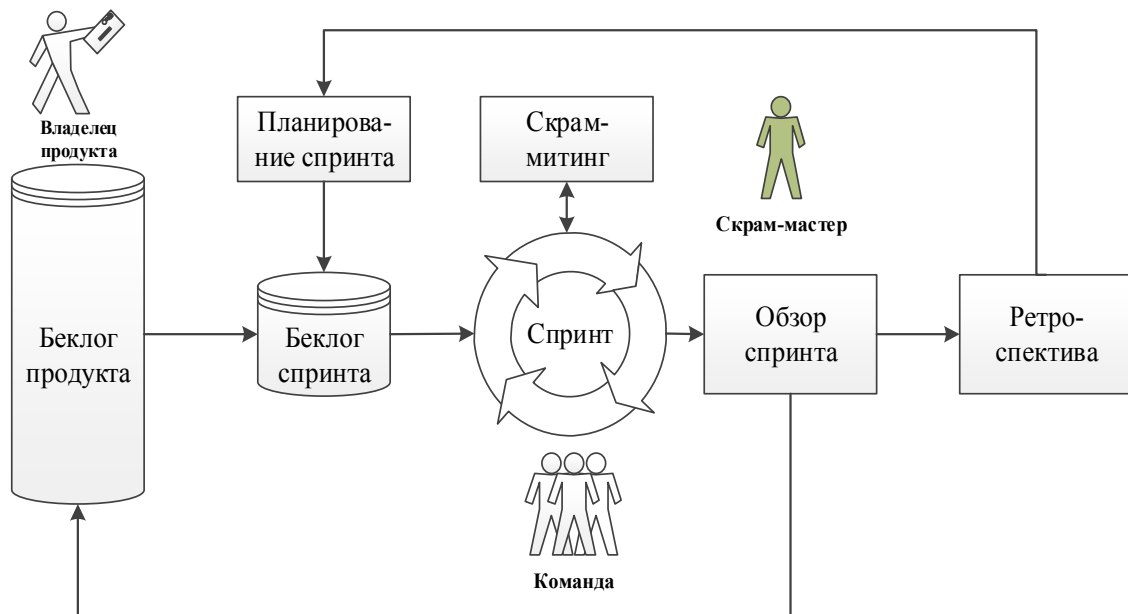


Рис. 4.1.3. Управление проектами по методологии Scrum

Также в рамках методологии Scrum предусмотрено проведение ежедневных встреч команды (*scrum-митинг*), чаще всего не более 15 минут, на которых каждый член команды отвечает на вопросы: «Что было сделано?», «Что будет сделано?», «Какие есть проблемы?». Scrum-митинги необходимы для синхронизации действий в команде и решения текущих проблем.

Таким образом, в рамках методологии Scrum можно выделить три роли (команда, scrum-мастер, владелец продукта), три совещания (scrum-митинг, обзор спринта, ретроспектива) и три инструмента (беклог продук-

та, беклог спринта, спринты). Более подробно функции представлены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1

Роли в Scrum

Роль	Функционал
Владелец продукта	Формулирует требования, формирует беклог продукта; отвечает за расстановку приоритетов при реализации требований
Scrum-мастер	Проводит scrum-митинг, обзор спринта, ретроспективу; отвечает за соблюдение процедур
Команда	Реализует требования владельца продукта.

*Методы управления продуктом*

Управление продуктом заключается в формировании беклога продукта [10]. Чаще всего гибкие методологии используются в проектах, связанных с созданием нового продукта и для формирования беклога прибегают к приему – «Анализ персон», т.е. представляют потребителей, разрабатываемого продукта, и какой функционал им необходим. Весь функционал фиксируется в *пользовательских историях* – карточки, которые содержат идентификационный номер, описание необходимого функционала в продукте (историю пользователя), оценку важности, трудозатраты и т.п.

Стоит отметить, что размер беклога, с одной стороны, должен быть большим, чтобы осуществлять долгосрочное планирование, а с другой – малым для того, чтобы было удобно планировать ближайшие спринты. Данное противоречие разрешается за счет разной степени детализации описания функционала будущего продукта. Для требований, имеющих высокую важность, т.к. реализация их начнется в ближайших спринтах, делается подробное описание, что позволяет легко планировать их реализацию, в то время как требования, срок реализации которых достаточно далеко, описываются поверхностно (рис. 4.1.4).

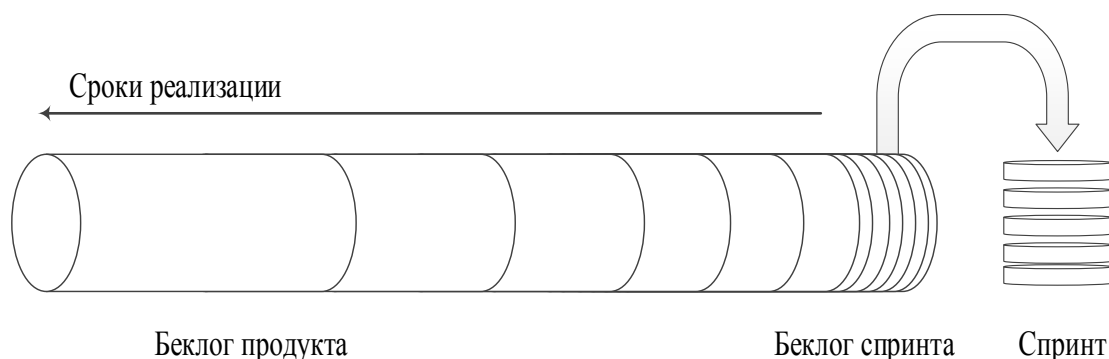


Рис. 4.1.4. Детализация в описании требований

Для ранжирования требований по степени важности, могут быть использованы экспертные методы принятия решений.

#### *Методы управления командой*

Одной из важнейшей характеристик истории пользователя, необходимой для планирования спринта, является оценка трудозатрат на ее выполнение. В практику scrum вводят условную единицу оценки трудозатрат – сторипоинты (баллы истории). За один спринт может быть выполнено определенное количество сторипоинтов. Тем самым накладываются ограничения на количество задач, выполняемых в рамках одного спринта. Сторипоинты можно заменить на любые другие показатели, характеризующие трудозатраты, например, часы, человеко-часы и т.п.

Таким образом, каждый спринт формируется исходя из производительности команды. При этом одной из важнейших задач в рамках управления проектами по методологии scrum является повышение точности прогнозирования производительности. Для этого после каждого спринта необходимо делать ее оценку и вносить корректировки при необходимости для более точного планирования работы (рис.4.1.5).

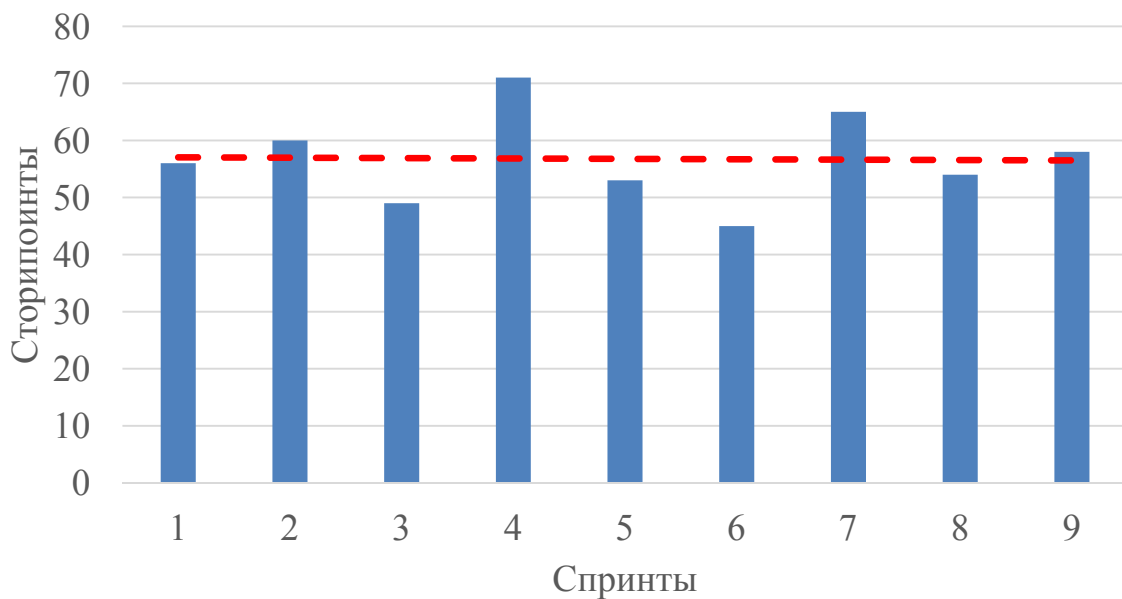


Рис. 4.1.5. Детализация в описании требований  
(пунктиром показано среднее значение)

Для контроля за ходом спринта используется *диаграмма сгорания* (burndown diagram). Это временная диаграмма, на которой отражаются дни спринта и количество выполненной работы в требованиях или сторипоинтах.



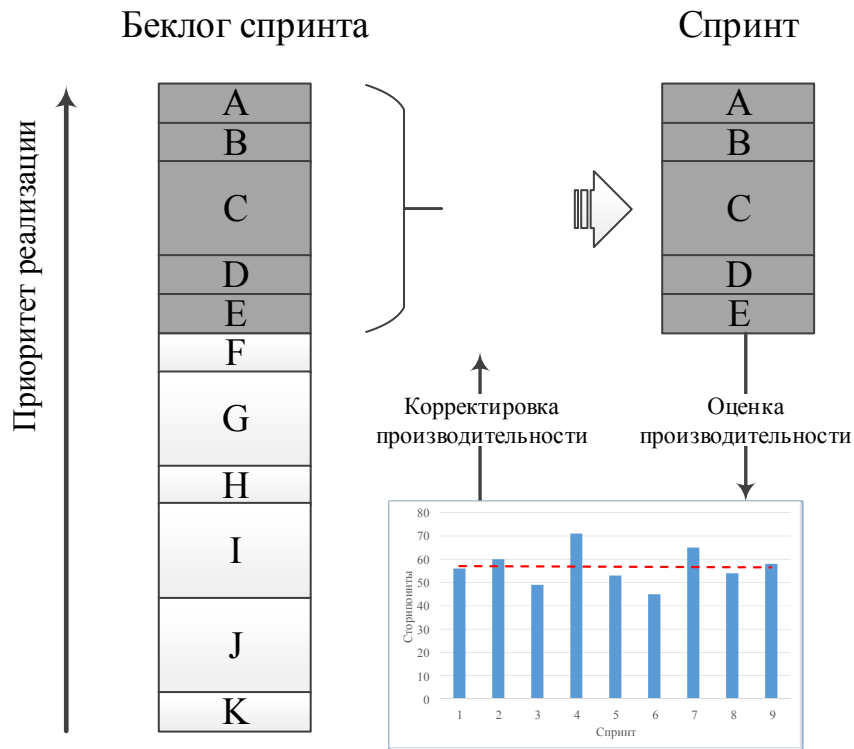


Рис. 4.1.6. Формирование спринта на основе беклога спринта

Например, на рис. 4.1.7 показана диаграмма сгорания для двухнедельного спринта.

Анализ диаграммы проводится путем сравнения идеальной линии со скоростью реального процесса, существенные отклонения обсуждаются на scrum-митингах, где вырабатываются корректирующие мероприятия.

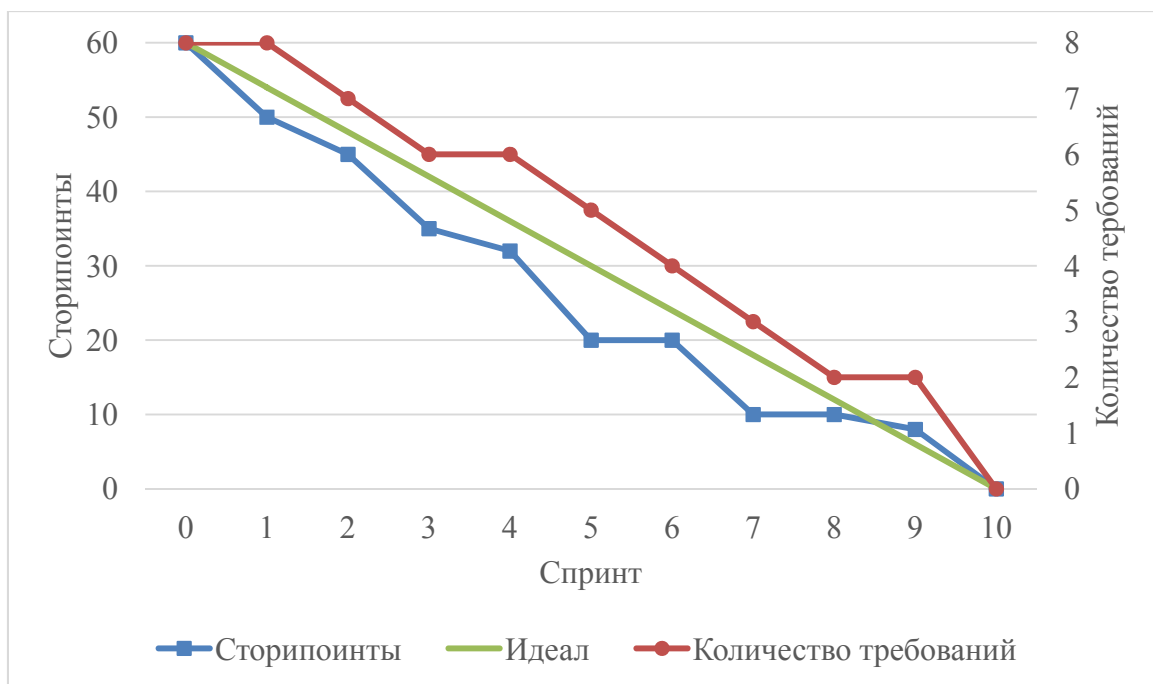


Рис. 4.1.7. Пример диаграммы сгорания двухнедельного спринта

Еще одним инструментом, позволяющим эффективно управлять командой проекта, является доска задач, которая так же, как и диаграмма сгорания, визуализирует ход спринта.



Рис. 4.1.8. Доска задач (начало)

На доске задач размещаются истории пользователей (рис. 4.1.8), далее истории перемещаются по мере перехода от одного специалиста к другому или от одной фазы работ к другой (рис. 4.1.9).

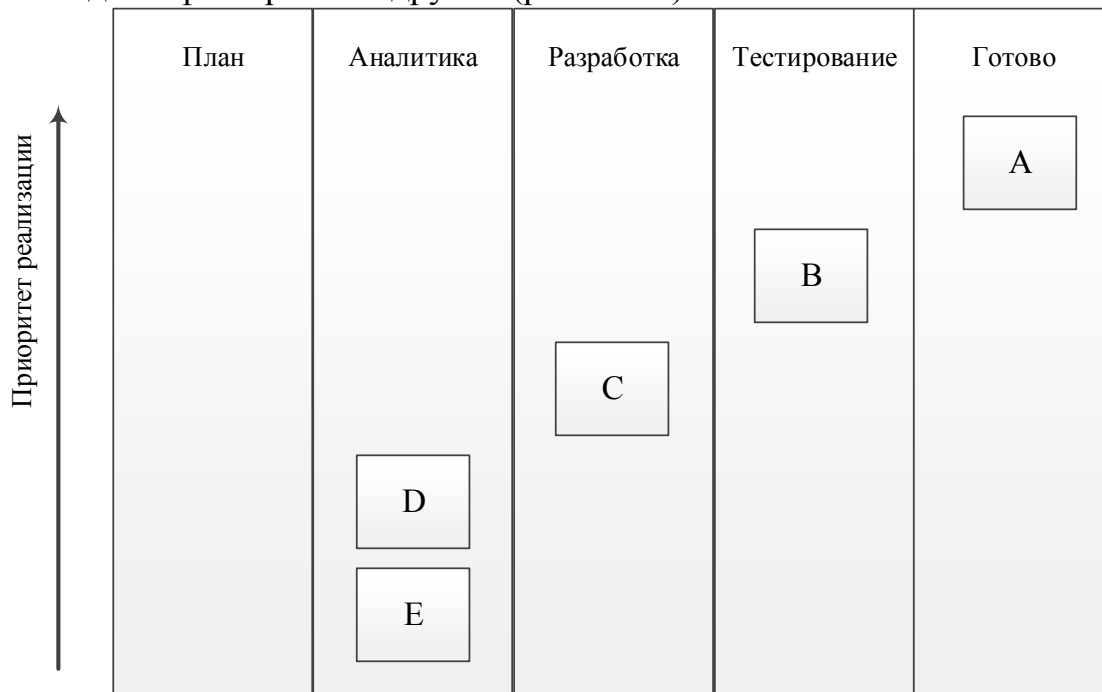


Рис. 4.1.9. Доска задач (выполнение спринта)

Иногда встречаются варианты досок задач, содержащие несколько спринтов одновременно (рис. 4.1.10).



Рис. 4.1.10. Расширенная на несколько спринтов доска задач

#### *Методы управления контрактами*

Классическая задача управления проектами: «Сделать проект в срок, в рамках бюджета, реализовав полностью функционал и соблюдая установленные критерии качества». В данной главе попытаемся ответить на вопрос определения сроков проекта в рамках гибких методологий.

Для оценки сроков проекта в scrum используется знание о производительности команды за предыдущие проекты, либо из анализа производительности первоначальных спринтов. Вследствие того, что объем требований к продукту (величина беклога продукта) известен, хоть и с некой долей неопределенности, первоначальную длительность проекта определяют, экстраполируя линию выполнения требований на диаграмме сгорания до пересечения с осью времени (рис. 4.1.11).

Расчеты ведутся либо в количестве требований, либо в сторипointах. Так как методология предполагает возможность добавления владельцем продукта новых требований, после каждого проведенного спринта, то количество оставшихся для выполнения требований должно корректироваться на эту величину (рис. 4.1.12).

Еще один метод построения диаграммы сгорания заключается в построении добавленных требований в отрицательной зоне, т.е. верхняя линия показывает скорость выполнения требований, а нижняя линия – скорость добавления требований. Общая длительность проекта определится в точке пересечения линий (рис. 4.1.13).

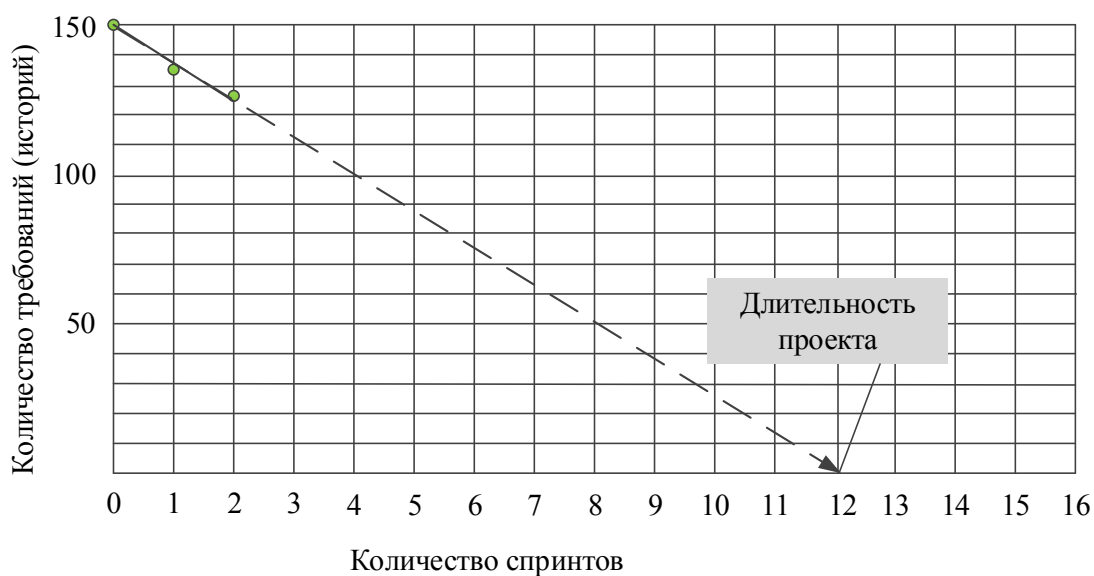


Рис. 4.1.11. Определение длительности проекта с фиксированным беклогом

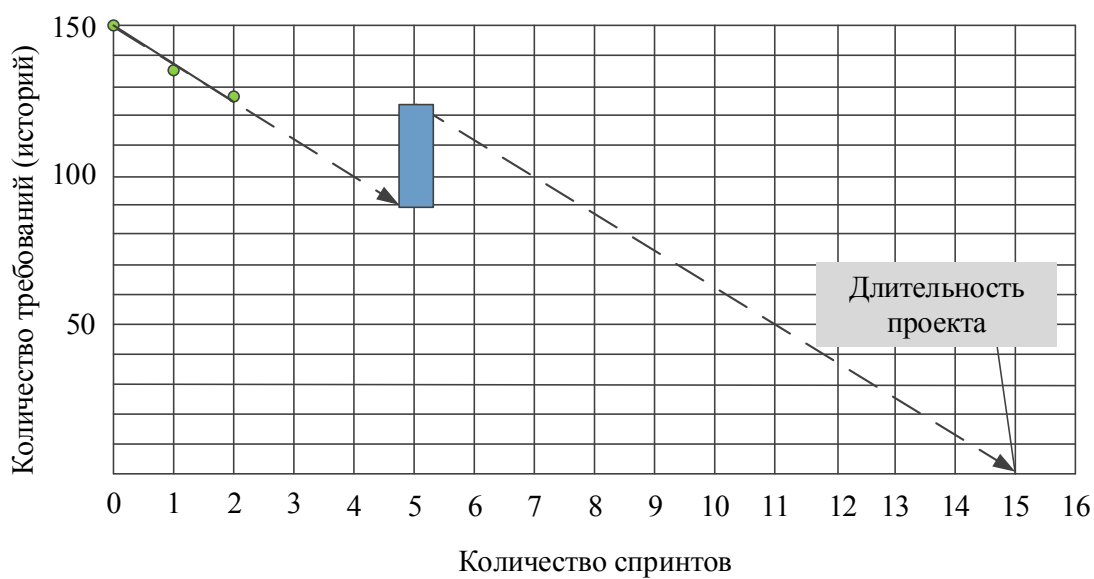


Рис. 4.1.12. Определение длительности проекта при добавлении требований

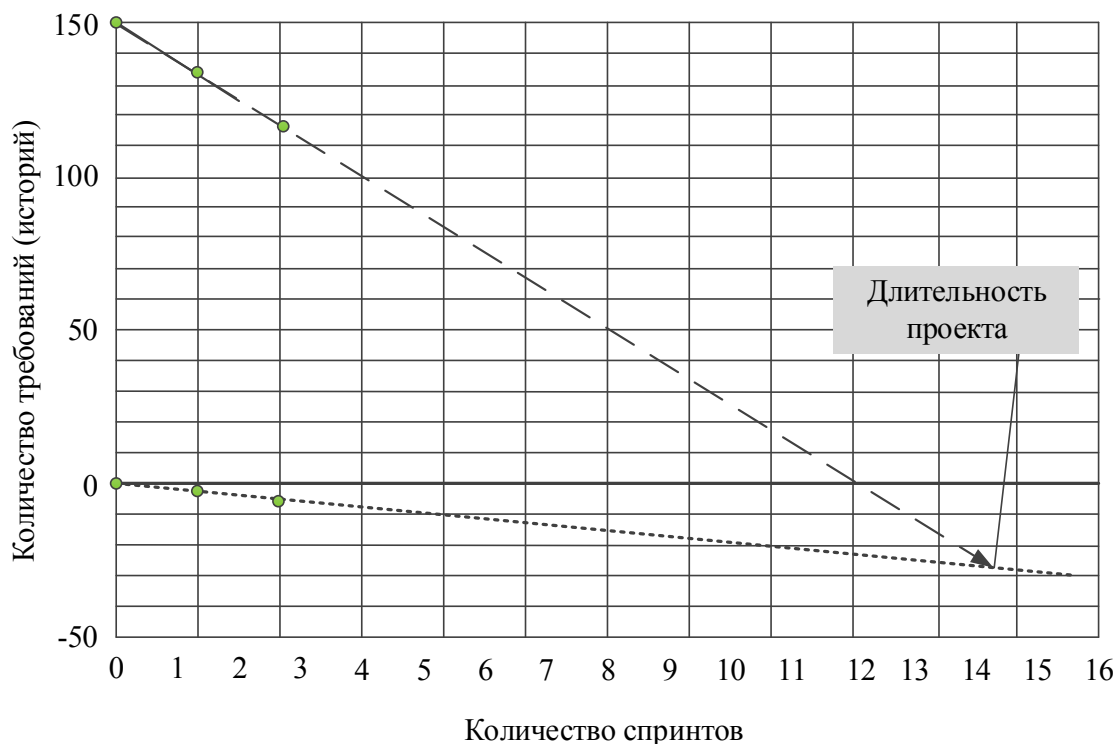


Рис. 4.1.13. Определение длительности проекта при многократном добавлении требований

### Методы управления рисками

Вследствие того, что количество выполненных и добавленных требований является величиной случайной, то и длительность проекта, определяемая как размер беклога, отнесенная к производительности команды, тоже будет величиной случайной.

Пусть  $g_1$  – функция плотности вероятности объема выполненных работ за один спринт,  $g_2$  – за два спринта,  $g_3$  – за три спринта и т.д. Примем, что данные функции подчиняются нормальному закону распределения (рис. 4.1.14).

Нанеся на график оставшийся объем работ по проекту, можно определить вероятность окончания проекта на каждом спринте. Так, на рисунке 4.1.15 представлена функция плотности распределения вероятности объема выполнения работ за три спринта, а заштрихованная область равна вероятности завершения работ по проекту объемом 100 единиц.

Рассчитав вероятность окончания проекта для различного числа спринтов, можно построить график, представленный на рисунке 4.1.16, где столбики означают вероятность окончания проекта в конкретный спринт, линия – кумулятивную вероятность окончания проекта за данное количество спринтов.

Беря на себя определенный уровень риска, можно оценивать длительность окончания проекта.

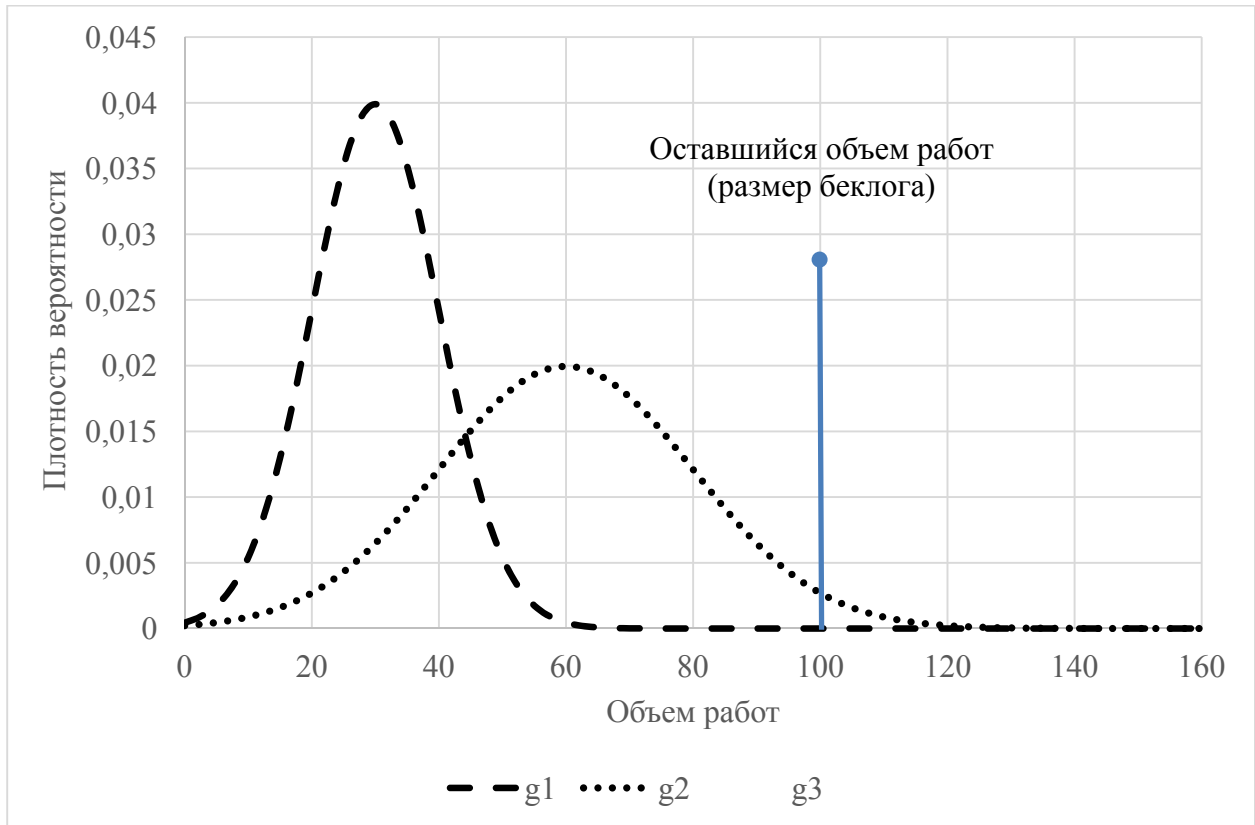


Рис. 4.1.14. Плотность распределения вероятности выполнения работ

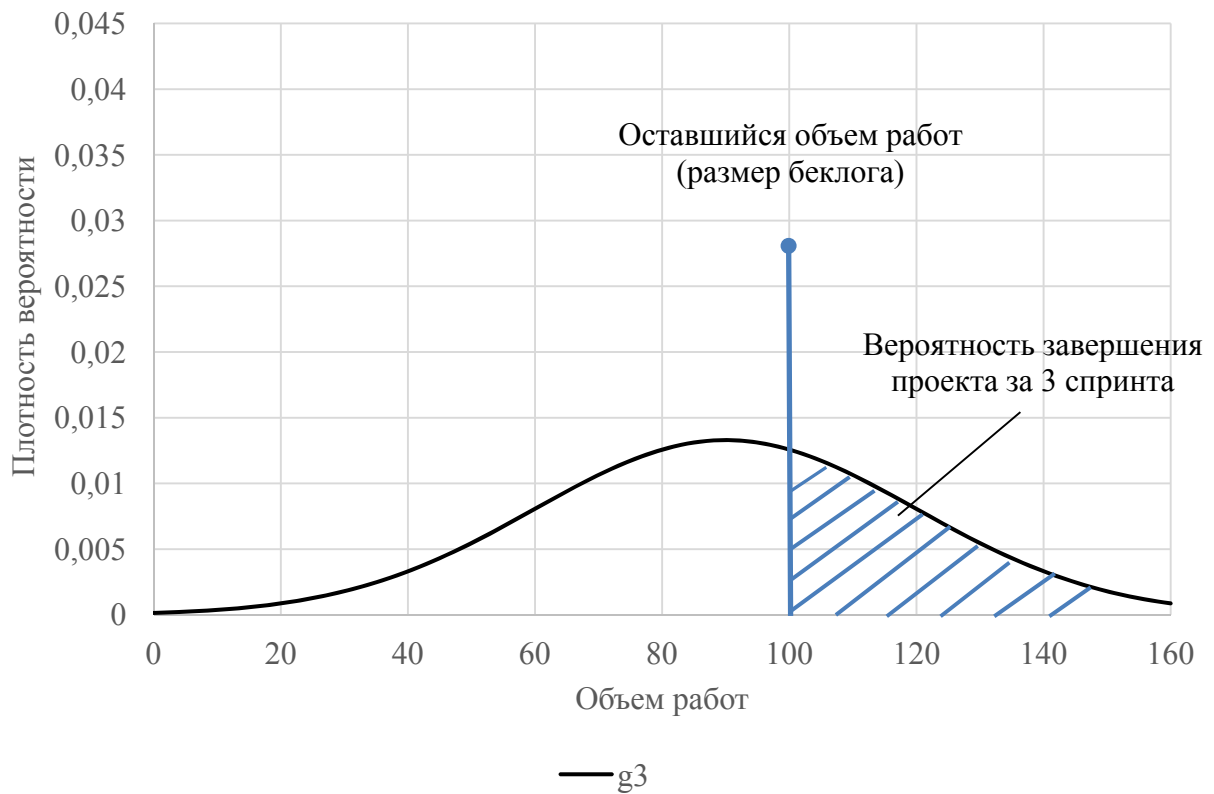


Рис. 4.1.15. Плотность распределения вероятности выполнения работ

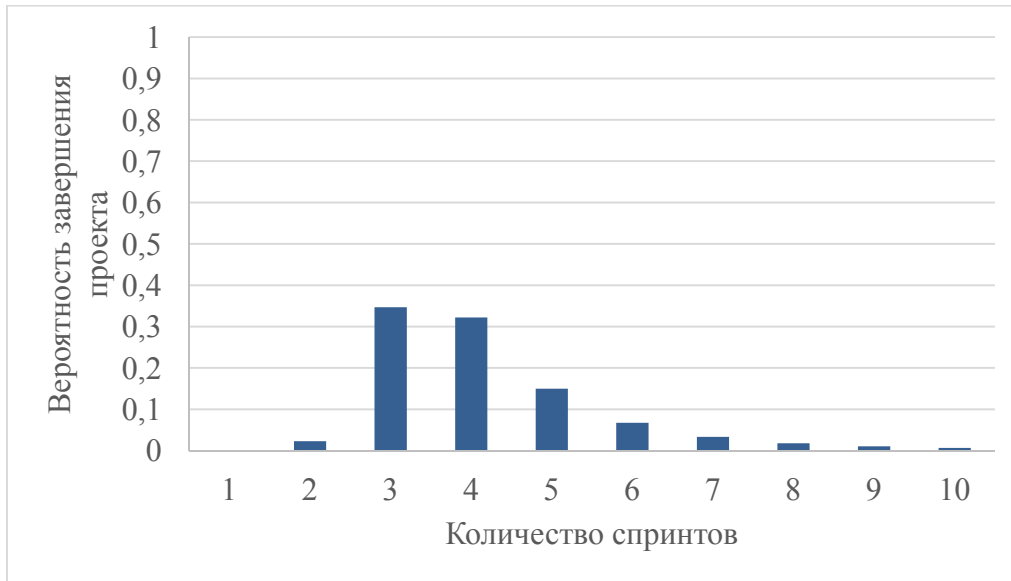


Рис. 4.1.16. Вероятность завершения проекта

Еще одним способом борьбы с рисками в гибких методологиях является буферизация, заключающаяся во включении в проект, наряду с обязательными требованиями клиента, требований, который клиент считает опциональными. Так, в рамках метода разработки динамических систем (dynamic systems development method – DSDM) все требования разделяют на четыре категории: обязательные, желательные, опциональные, ненужные. В рамках метода DSDM при планировании проекта в него включают не более 70% обязательных требований, остальной объем работ приходится на буфер [4]. Буферизация позволяет успешно выполнять проект в случае возникновения нештатных ситуаций, увеличивающих время выполнения обязательных требований.

Наряду с буфером в виде опциональных требований можно строить буфера по времени, пытаясь учесть риски, связанные с нарушением длительности выполнения требований.

Величина временного буфера может быть определена на основе вероятностных оценок времени выполнения требований. Учитывая то, что два среднеквадратичных отклонения определяются как разница в оценках между длительностью с 50%-й вероятностью выполнения работы ( $l_{50}$ ) и 90%-й вероятностью выполнения работы ( $l_{90}$ ), то для проекта с  $n$  количеством требований, среднеквадратическое отклонение можно определить как среднегеометрическое:

$$2\sigma \approx \sqrt{\left((l_{90,1} - l_{50,1})^2 + (l_{90,1} - l_{50,1})^2 + \dots + (l_{90,n} - l_{50,n})^2\right)}.$$

Для примера рассмотрим реализацию проекта с семью пользовательскими историями (требованиями).

Таблица 4.1.2

Определение размера буфера проекта с семью историями

История	Длительность выполнения (50%) – $l_{50}$ .	Длительность выполнения (90%) – $l_{90}$ .	$(l_{90} - l_{50})^2$
История 1	5	13	64
История 2	4	9	25
История 3	1	3	4
История 4	4	8	16
История 5	2	3	1
История 6	1	1	0
История 7	4	7	9
Итого	21	44	119

Таким образом, величину буфера для проекта, представленного в таблице 4.1.2, можно оценить в 11 единиц. В качестве единиц измерения могут быть использованы либо дни, либо человеко-часы, либо сторипоинты, все зависит от принятых в проекте единиц измерения трудозатрат.

## Глава 4.2. Масштабирование проектов по гибкой методологии

Классическая схема scrum, рассмотренная нами выше, используется для управления проектами, в которых задействована одна команда. Команды численностью 5–9 человек являются наиболее эффективными звеньями, так как с ростом численности резко возрастают издержки на коммуникации, и общая эффективность понижается.

Типовое звено scrum-проекта состоит из команды проекта (одним из членов команды является также scrum-мастер) и владельца продукта, который не входит в состав команды, но формирует требования к продукту в беклоге (рис. 4.2.1).

Наиболее просто масштабирование достигается, если необходимо произвести горизонтальное разделение проекта, когда несколько команд работает параллельно над различными частями проекта. Данное разделение можно реализовать за счет организации нового уровня управления во главе с менеджером программы, в которую входят несколько scrum-команд.



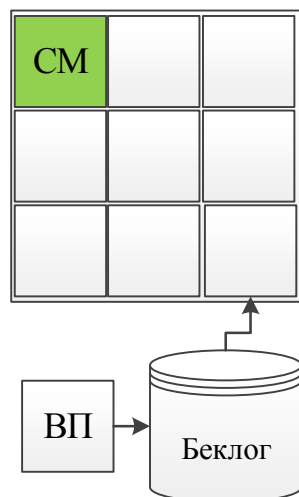


Рис. 4.2.1. Типовое звено scrum-проекта  
(СМ – scrum-мастер, ВП – владелец продукта)

Организация работы на вышестоящем уровне происходит по тем же правилам scrum, т.е. для координации действий проводятся scrum-митинги с участием scrum-мастеров от каждой команды.

После координации деятельности scrum-мастеров для осуществления успешного масштабирования необходимо согласовать действия по формированию беклога программы, что достигается при помощи организации scrum-митингов владельцев продуктов (рис. 4.2.1).

При необходимости такое масштабирование может быть продолжено («scrum of scrum of scrum»). В данном случае координацию своих действий должны осуществлять руководители программ. Чаще всего на данном уровне общее руководство осуществляется одним из топ-менеджеров компании.

Организация работ в нескольких параллельных проектах, позволяет также гибко организовать финансирование работ. В рамках гибкой методологии отсутствует привязка бюджета к конкретному проекту. Финансирование происходит из общего источника, т.е. в зависимости от приоритетов, которые могут меняться после каждого окончанного спринта, финансирование может быть перенаправлено от одной команды к другой. Данная процедура позволяет менять производительность и содержание работ в различных проектах.

Важно отметить, что решение о перераспределении финансирования принимается автономно на каждом уровне управления, т.е. в рамках своих компетенций владельцами продуктов соответствующего уровня.

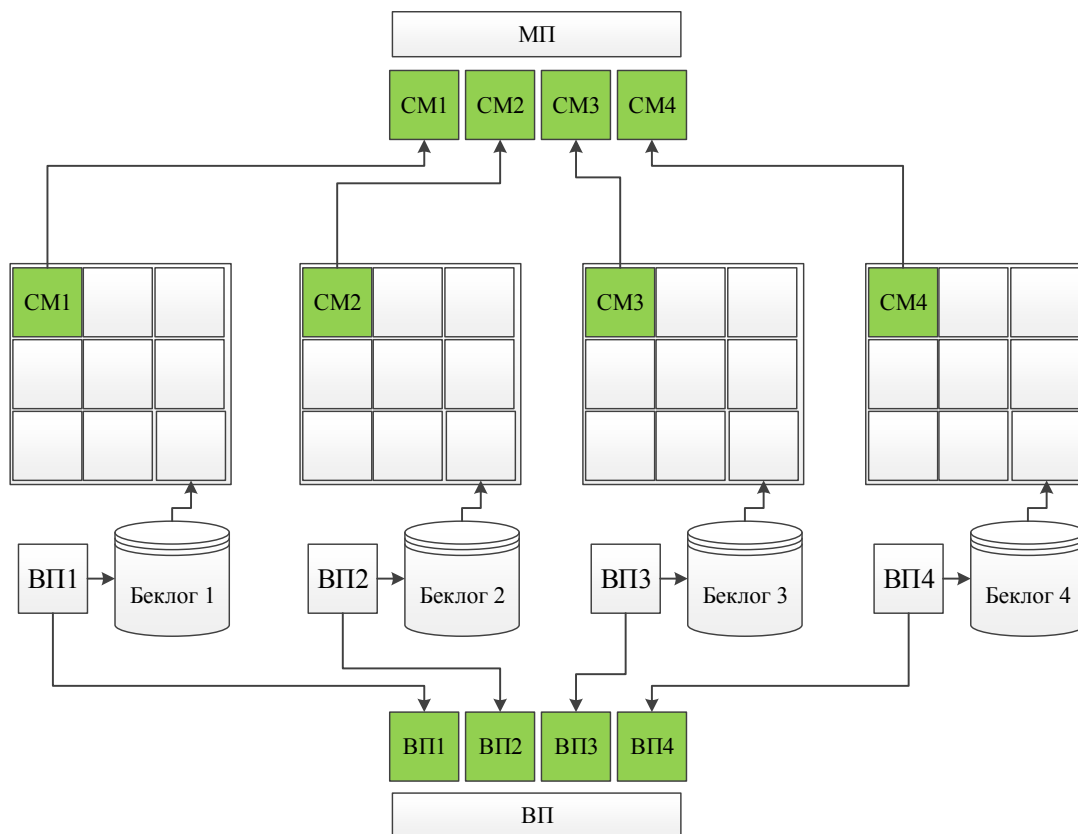


Рис. 4.2.2. Масштабирование Scrum («scrum of scrum»)

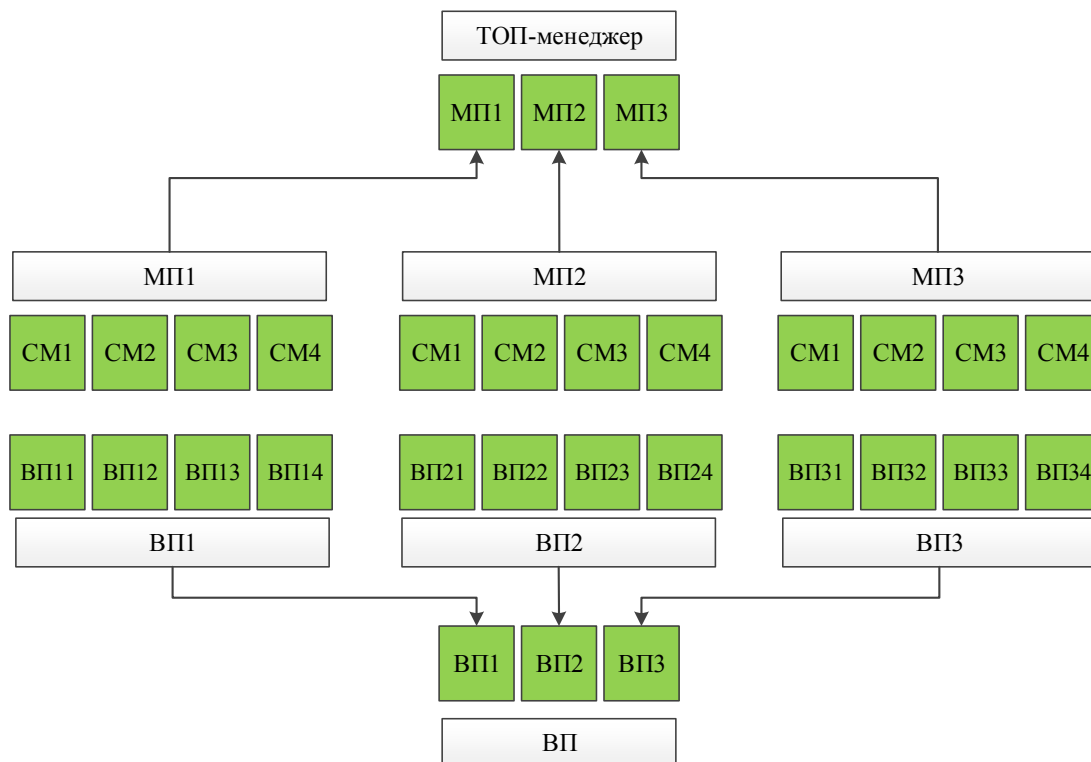


Рис. 4.2.3. Масштабирование Scrum («scrum of scrum of scrum»)

## Библиографический список к части 4

1. Ауэр К., Миллер Р. Экстремальное программирование: постановка процесса с первых шагов и до победного конца / К. Ауэр, Р. Миллер – СПб.: Питер, 2004. – 368 с.
2. Бек К. Экстремальное программирование /К. Бек – СПб.: Питер, 2002. – 224 с.
3. Голлай, А.В. Применение гибкой методологии в управлении проектами по совершенствованию производственной деятельности промышленного предприятия / А.В. Голлай, Я.Д. Гельруд // Управление проектами и программами. – 2017. – № 04(52). – С. 294–301.
4. Кон, М. Agile: Оценка и планирование проекта / М. Кон. – М.: Альпина Паблишер, 2018. – 245 с.
5. Кон, М. Scrum. Гибкая разработка ПО /М. Кон. – М.: Вильямс, 2013. – 576 с.
6. Коул, Р. Блистательный Agile. Гибкое управление проектами с помощью Agile, Scrum и Kanban» / Р. Коул, Э. Скотчер. – СПб.: Издательство «Питер», 2018. – 180 с.
7. Попендик, М. Бережливое производство программного обеспечения. От идеи до прибыли /М. Попендик, Т. Попендик. – М.: Вильямс, 2010. – 257 с.
8. Сазерленд, Д. Постигая SCRUM. Революционный метод управления проектами / Д. Сазерленд. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. – 272с.
9. Стеллман, Э. Постигая Agile. Ценности, принципы, методологии / Э. Стеллман, Д. Грин. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 448 с.
10. Пихлер, Р. Управление продуктом в Scrum. Agile-методы для вашего бизнеса / Р. Пихлер . – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 460 с.
11. Hirotaka Takeuchi, Ikujiro Nonaka. The New New Product Development Game // Harvard Business Review, 1986, January/February, p. 285–305.
12. Koch, A.S. Agile Software Development: Evaluating the Methods for Your Organization / A. S. Koch. – Artech House, 2004. – 280 с.
13. Rigby D. K., Sutherland J., Takeuchi, H. The Secret History of Agile Innovation [Электронный ресурс] // Harvard Business Review – 2016. – № 4. – Режим доступа: [<https://hbr.org/2016/04/the-secret-history-of-agile-innovation>].
14. Топ-7 методов управления проектами: Agile, Scrum, Kanban, PRINCE2 и другие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<http://www.pmservices.ru/project-management-news/top-7-metodov-upravleniya-proektami-agile-scrum-kanban-prince2-i-drugie>].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*Бурков Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, автор более 400 научных трудов, в том числе 12 научных монографий и 5 учебных пособий, заведующий лабораторией активных систем Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук.

*Гельруд Яков Давидович* – доктор технических наук, автор более 130 научных трудов, в том числе 3 научных монографий и 11 учебных пособий, профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах Южно-Уральского государственного университета.

*Голлай Александр Владимирович* – кандидат химических наук, доцент, автор 40 научных трудов, доцент кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах Южно-Уральского государственного университета.

*Логиновский Олег Витальевич* – доктор технических наук, профессор, действительный государственный советник I класса, заслуженный деятель науки Российской Федерации, автор 500 научных трудов, в том числе 21 научной монографии и 20 учебных пособий, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах Южно-Уральского государственного университета, руководитель научно-образовательного центра Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук при ЮУрГУ. С 1990 по 2010 гг. – председатель Комитета информационного и программного обеспечения Правительства Челябинской области.

*Новиков Дмитрий Александрович* – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Автор более 500 научных трудов по теории управления системами междисциплинарной природы, в том числе – по кибернетике, системному анализу, теории игр, принятию решений, управлению проектами и математическим моделям механизмов управления социально-экономическими системами.

*Шестаков Александр Леонидович* – доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, автор более 200 научных трудов, в том числе 13 научных монографий и 11 учебных пособий, ректор Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), вице-президент Союза ректоров высших учебных заведений Российской Федерации.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>ЧАСТЬ 1. ИСТОРИЧЕСКАЯ РЕТРОСПЕКТИВА, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ</b>	
Глава 1.1. Эволюция методов описания проектов.....	5
Глава 1.2. Особенности и современные проблемы управления проектами.....	8
Глава 1.3. Стандарты управления проектами .....	26
Библиографический список к части 1 .....	33
<b>ЧАСТЬ 2. МЕХАНИЗМЫ УМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ</b>	
Глава 2.1. Формирование целей и задач вариантов проекта.....	35
Глава 2.2. Выбор варианта проекта.....	40
Глава 2.3. Формирование состава исполнителей.....	47
Глава 2.4. Распределение ресурсов для выполнения проекта.....	53
Глава 2.5. Механизмы распределения затрат.....	62
Глава 2.6. Финансирование проекта.....	65
Глава 2.7. Стимулирование исполнителей проекта.....	75
Глава 2.8. Управление рисками проекта .....	86
Библиографический список к части 2.....	92
<b>ЧАСТЬ 3. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ ДЛЯ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ СТОРОН</b>	
Глава 3.1. Модели и механизмы управления проектами для инвестора..	94
Глава 3.2. Модели и механизмы управления проектами для заказчика...	101
Глава 3.3. Модели и механизмы управления проектами для генпоставщика.....	116
Глава 3.4. Математические модели управления проектами для генконтрактора, руководителя проекта и его команды.....	134
Глава 3.5 Модели и механизмы управления проектами для регулирующих и надзорных органов.....	149
Глава 3.6. Модели и механизмы управления проектами для коммерческой службы.....	161
Библиографический список к части 3.....	168
<b>ЧАСТЬ 4. ГИБКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ</b>	
Глава 4.1. Методологии гибкого управления проектами.....	171
Глава 4.2. Масштабирование проектов по гибкой методологии.....	184
Библиографический список к части 4.....	187
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b> .....	188

*Учебное издание*

Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гельруд Я.Д., Голлай А.В.,  
Логиновский О.В., Шестаков А.Л.

УМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ

Учебное пособие

Под редакцией члена-корреспондента РАН Д.А. Новикова

Техн. редактор *А.В. Миних*  
Дизайн обложки *А.В. Глушковой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 04.03.2019. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 11,16. Тираж 1000 экз. Заказ 156/364.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.