На правах рукописи

ГЕЛЬРУД Яков Давидович

Циклическая стохастическая сетевая модель оптимизации управления проектами

Специальности: 05.13.10 – «Управление в социальных и экономических системах», 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 2000

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научные руководители:
доктор технических наук, профессор, академик Воропаев В.И.,
доктор технических наук, профессор, академик Логиновский О.В.

Научный консультант –
кандидат экономических наук, доцент Авербах Л.И.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Карманов Ю.Т.,
доктор технических наук, профессор Поздняков В.В.

Ведущая организация –
Уральский государственный технический университет.

Защита состоится 28 июня 2000 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета К 053.13.08 при Южно-Уральском государственном университете по адресу:
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76,
конференц-зал ЮУрГУ (ауд.244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 27 мая 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд.техн.наук, доцент А.М.Коровин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации изложены основные научные результаты, полученные и опубликованные в 1973–2000 гг., связанные с моделями и методами планирования работ при управлении проектами.

Высокая степень сложности и трудоемкости составления планов выполнения большого числа работ многими участниками проекта с учетом широкой номенклатуры используемых ресурсов, необходимость систематического контроля за их выполнением и корректировок, требуют соответствующих эффективных методов решения этого сложного класса задач.

Разработке моделей и методов решения задач планирования работ при управлении проектами посвящены работы Э.Э. Абелиса, Ю.А. Авдеева, Л.И. Авербаха, Г.М. Адельсона-Вельского, В.А. Бриедиса, С.Н. Булгакова, В.Н. Буркова, С.Д. Бушуева, В.И. Воропаева, Л.Г. Голуба, О.М. Дукарского, С.И. Зуховицкого, Л.М. Каплана, Е.Б. Кибалова, В.И. Климова, А.Д. Колодкевича, Л.М. Лаврецкого, Н.А. Мамед-Заде, С.П. Никанорова, Т.Я. Орел, В.В. Позднякова, М.И.Рейтмана, В.И. Рыбальского, Я.А. Рекитара, В.И. Садовского, Н.В.Скрыдлова, М.Б. Слуцкого, Б.И. Хацет, Ю.И. Черняка, Э.А. Чудновского, Ю.В. Швецова, М.В. Шейнберга, Э.Л. Эткида и др. Теоретические основы управления сложными проектами, систем и средств автоматизации проектирования заложена в трудах А.Г.Аганбегяна, К. Бержа, Н.П. Бусленко, Д.И. Голенко, А.А. Гусакова, Дж. Келли, М.Е.Косицкого, С.Е. Лившица, О.В.Логиновского, Дж. Мартина, А.М. Немчина, С.Н. Никешина, В.Н. Решетникова, С.А.Редкозубова, А.Притцкера, Д. Фалкерсона, Д. Филлипса и др. В диссертации используются также методы теории оптимальных систем, теории графов, статистического моделирования, теории экспертных систем, характеризационного анализа, некоторые элементы робастных технологий, получившие развитие в трудах Г.С. Поспелова, В.А.Горбатова, Л.В.Канторовича, Н.Н. Моисеева, О.Оре, Б.П. Титаренко, Ю.В. Сутта, Д.Б. Юдина, С.М. Ермолаева, М. Кендэла, М. Кумбса, Дж. Элти, С. Янга.

Актуальность темы исследования

Рассматривается проблема планирования и управления проектом, как целенаправленного комплекса взаимосвязанных работ с учетом риска и неопределенности условий их выполнения.

Кроме того, при постановке и решении задач планирования работ проекта учитываются ограниченность ряда ресурсных характеристик и требования к динамике их потребления (например, требование равномерности).

Применяемые математические методы моделирования процессов реализации проектов (классические сетевые модели, обобщенные и стохастические сетевые модели) не всегда оказываются в достаточной степени адекватными сложным реалиям моделируемого процесса. Причем это относится к каждому методу в отдельности и даже к некоторым комбинациям их друг с другом.

Все это показывает актуальность диссертационной работы, связанной с разработкой универсальной и эффективной в практическом использовании сетевой модели и методов решения задач планирования работ при управлении сложными проектами.

Целью диссертационной работы является разработка общей постановки задачи планирования работ при управлении сложными проектами на основе использования универсальной сетевой модели, позволяющей рассматривать обобщенные сетевые модели (с их богатым спектром возможностей описания организационно-технологической структуры проекта) и стохастические модели, в значительной степени учитывающие фактор риска и неопределенности при осуществлении проекта, как ее частные случаи.

Не менее важной целью является также создание соответствующих методических и алгоритмических средств для решения указанных задач на базе созданной универсальной сетевой модели.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие основные **задачи**:

1. Разработка универсальных средств моделирования, в принципе позволяющих описывать на «сетевом языке» процесс осуществления проекта с учетом всех специфических особенностей объекта управления;
2. Выработка условий непротиворечивости модели, сформированной на основе предлагаемых средств;
3. Разработка алгоритмических и методических средств, позволяющих получать оптимизированные календарные планы работ, выполняемых при реализации сложного проекта в условиях риска и неопределенности;
4. Обоснование сходимости алгоритмов и допустимости получаемых планов.

Методы исследования. Теоретической и методологической основой исследования послужили методы общей теории систем, теории управления, теории графов, математического моделирования и алгоритмизации задач планирования работ при управлении проектами. В работе использованы также статистические методы, модели и алгоритмы стохастического и динамического программирования и имитационного моделирования.

Научная новизна проведенных автором исследований состоит в следующем:

- на основе анализа различных содержательных аспектов задач планирования и управления сложными проектами сформулированы общие требования к технологической модели процесса реализации проекта и моделям задач планирования работ и управления проектами;
- проведен сравнительный анализ имеющегося модельного и алгоритмического обеспечения задач планирования и управления проектами;
- разработана общая постановка задачи планирования и управления проектами и универсальные средства моделирования процесса реализации проекта, позволяющие свести все известные модели к ее частным случаям;

• на основе использования универсальной модели рассмотрен ряд моделей задач планирования работ при управлении проектами в различных условиях функционирования и с разными целевыми установками;

• для этих моделей разработаны соответствующие алгоритмы решения с применением статистических методов, некоторых приемов стохастического и динамического программирования, имитационного моделирования.

Практическая значимость. Проведенные научные исследования изначально имели определенную прикладную направленность. Полученные теоретические результаты – универсальные средства моделирования и алгоритмы решения задач календарного планирования проектов – позволяют:

• создать методологию планирования и управления проектами на основе использования универсальных средств моделирования и соответствующих алгоритмов решения задач;

• расширить сферу применения методов сетевого моделирования для управления такими проектами, сложность которых обусловлена разнообразием технологических зависимостей между отдельными работами, вероятностным характером взаимосвязей и параметров работ, осуществляемых в условиях неопределенности (существующие методы моделирования не обеспечивают достаточную степень адекватности моделей реальной сложности таких проектов);

• создать универсальные пакеты прикладных программ сетевого моделирования, позволяющие решать широкий спектр задач планирования работ при управлении проектами. При этом все ранее известные методы сетевого моделирования (классические модели, обобщенные, стохастические и пр.) являются частным случаем предложенных универсальных средств моделирования, что предопределяет широкую сферу возможностей практического применения такого пакета программ.

Следует отметить, что математические модели и методы, являющиеся частными случаями описанных в работе средств, внедрены в составе более 50 автоматизированных систем управления в строительстве (организации Главюжуралстроя, Главсредуралстроя, Главдальстроя Минтяжстроя СССР, Главдальводстроя, ГлавУзводстроя, Главволгоградводстроя Минводхоза СССР, ГлавКоминефтегазстроя, Главтюменьнефтегазстроя Миннефтегазстроя СССР и др.), в которых автор являлся ответственным исполнителем математического и программного обеспечения.

В работе также предложены практические рекомендации по выбору критериев оптимизации и ограничений в зависимости от конкретных условий реализации проекта, а также описывается технология подготовки данных.

Апробация работы. Результаты исследования докладывались и обсуждались на конференциях в 1973–2000 гг. в городах Москве, С-Петербурге, Киеве, Одессе, Вильнюсе, Таллинне, Кишиневе, Ташкенте, Душанбе, Новосибирске, Челябинске, Екатеринбурге. Последние доклады сделаны на международном симпозиуме СОВНЕТ-99: «Управление проектами:

Восток – Запад – грань тысячелетий» (Москва, 1999), Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития экономики России» (Челябинск, 2000), Международном научно-практическом семинаре: «Вопросы информатизации и управления органов государственной власти и местного самоуправления» (Челябинск, 2000).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и результатов, списка литературы, включающего 166 наименований, содержит 153 страницы основного текста, 2 таблицы и 12 рисунков.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Результаты анализа существующих моделей, методов и средств решения задач планирования работ при управлении проектами (классические, обобщенные и стохастические модели и методы реализации задач на их основе).
2. Теоретический базис диссертационного исследования, содержащий обоснование принципов и универсальных методов моделирования процедур реализации проектов, а также описание разработанной циклической стохастической сетевой модели (ЦССМ).
3. Классификация сетевых моделей и обоснование места в данной классификации разработанной ЦССМ.
4. Математические модели задач календарного планирования на основе ЦССМ и методы их решения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертационной работе рассматривается общая постановка задач планирования работ, описывается их роль и особенности в системе управления проектами. Вводится единый математический язык для описания многообразных понятий, встречающихся в достаточно широкой литературе по планированию сложных проектов.

Проведен анализ *технологических* аспектов (сложные взаимосвязи работ, многовариантность, альтернативность промежуточных результатов и действий, технологические критерии оптимизации), *организационных* аспектов (многоуровневость организационной структуры внутреннего и внешнего окружения, характеристика участников проекта, адресность выделения ресурсов и учета затрат, связь производственных и обеспечивающих процессов во времени, многотемность и общий резервуар ресурсов) и *экономических* аспектов (бюджет проекта, условно-постоянные и условно-переменные расходы, зависимость «время-стоимость», разновременность затрат, экономические критерии оптимизации).

На основе проведенного исследования технологических, организационных и экономических условий реализации проектов, с учетом вероятностного характера параметров проекта и воздействий внешнего и внутреннего окружения, сформулированы общие требования к *модели процесса* реализации проекта, отражающей взаимозависимости параметров контролируемых и

неконтролируемых переменных («ядро» модели) и к собственно *модели задачи* планирования работ.

Произведен анализ состояния рассматриваемой проблемы на современном этапе в историческом контексте.

Сделан обзор традиционных сетевых моделей и задач календарного планирования, решаемых на их основе:

- управление сроками завершения проектов (МСР, PERT-TIME);
- учет ограничений по ресурсам и оптимизация их использования («калибровка», «сглаживание», PERT-COST);
- многопроектные задачи сетевого планирования с учетом ограниченности ресурсов и сроков.

Произведен анализ преимуществ обобщенных сетевых моделей (ОСМ), разработанных В.И.Воропаевым, по сравнению с традиционными методами отражения технологических зависимостей при описании сложных проектов. Используя эти модели, можно отражать такие взаимосвязи между работами проекта, как совмещенное выполнение, непрерывность работ, учитывать переменную интенсивность их выполнения и отражать в модели зависимости и ограничения типа «не ранее» и типа «не позднее» на проект в целом, на отдельные работы и, что особенно важно, на части работ. ОСМ оказались более эффективны при описании строительных потоков, построении типовых сетевых моделей и для построения многоуровневых иерархических систем управления проектами с предоставлением декомпонированной или укрупненной информации о проекте в соответствии с потребностями различных участников проекта и уровней управления.

Проанализированы стохастические сетевые модели (GERT, VERT, CAAN, GAAN). Математический аппарат, лежащий в основе используемых при этом методов, позволяет существенно расширить сферу приложения данных моделей за счет учета факторов риска и неопределенности. Причем в этих моделях учитывается не только вероятностный характер отдельных параметров сетевой модели, но и вероятностная топология самой модели. Рассмотрены также различные варианты постановок задач планирования работ на базе стохастических сетевых моделей. Отдельно проанализированы качество и степень адекватности данных моделей реальным типам организационно-производственных систем.

Рассмотрены экономические критерии оптимизации на основе использования DCF-показателей оценки эффективности инвестиционных проектов (приведенной стоимости, чистого дисконтированного дохода и т. п.).

Первые идеи, связанные с использованием этих понятий для отрасли строительство были высказаны Л.В.Канторовичем еще в 1965 году В 1968 году Л.И.Авербахом были предложены сетевые алгоритмы оптимизации задач с DCF-показателями оценки, однако практического применения эти идеи в то время не нашли в силу их несовместимости с социалистическим способом хозяйствования. В настоящее время DCF-критерии заняли ведущее место в

оценке эффективности проектов, поэтому автор посчитал целесообразным разработанные более 30-ти лет назад подходы положить в основу формирования модели в части критериев оптимизации.

Формализация общей постановки задачи планирования работ при управлении проектами и описание созданной универсальной сетевой модели и задач временного анализа, решаемых на ее основе

В результате проведенного анализа предложена универсальная математическая модель, при этом классические, обобщенные и стохастические сетевые модели являются ее частными случаями.

Данная модель (названная *циклическая стохастическая сетевая модель - ЦССМ*) является более гибким и адекватным инструментом для описания процесса управления разработкой сложного проекта.

ЦССМ представляет собой конечный, ориентированный, циклический граф $G(\Omega,A)$, состоящий из множества событий Ω и дуг (i,j) (события i и $j \in \Omega$), определяемых матрицей смежности $A=\{p_{ij}\}$. $0 \leq p_{ij} \leq 1$, причем $p_{ij}=1$ задает детерминированную дугу (i,j), а $0 < p_{ij} < 1$ определяет альтернативное событие i, которое с вероятностью p_{ij} связано дугой с событием j. Множество дуг подразделяется на дуги-работы и дуги-связи. Первые реализуют определенный объем производственной деятельности во времени, второй тип дуг отражает исключительно логические связи между последними. Событиями могут быть как начала и окончания выполняемых работ, так некоторые их промежуточные состояния.

Обозначим через T_i время свершения i-го события, тогда соотношение между сроками свершения событий, связанных дугой (i,j), задается неравенством:

$$T_j - T_i \geq \psi_{ij}, \qquad (1)$$

где ψ_{ij} в общем случае случайная величина, распределенная по некоторому закону в интервале от $-\infty$ до 0 или от 0 до $+\infty$.

Кроме того, возможны абсолютные ограничения на момент реализации события i:

$$l_i \leq T_i \leq L_i. \qquad (2)$$

Соотношения (1)-(2) являются обобщением соответствующих неравенств при описании обобщенных сетевых моделей, где параметр ψ_{ij} и матрица смежности A носят детерминированный характер.

Рассмотрим смысловую нагрузку соотношения (1) при вероятностном характере параметра ψ_{ij}.

Если (i,j) есть дуга-работа (или ее часть), то положительно распределенная случайная величина ψ_{ij} задает распределение минимальной продолжительности этой работы (связанной с максимальным насыщением ее

определяющим ресурсом). В работе показано, что распределение величины ψ_{ij} является унимодальным и асимметричным, а данным требованиям удовлетворяет бета-распределение, таким образом, *минимальная продолжительность работы* есть случайная величина $\psi_{ij}=t_{min}(i,j)$, распределенная по закону бета-распределения на отрезке [a, b] с плотностью

$$\varphi(t)=C(t-a)^{p-1}(b-t)^{q-1}, \qquad (3)$$

где C определяется из условия $\int_a^b \varphi(t)dt=1$.

Если же случайная величина ψ_{ij} в (1), соответствующая дуге-работе (i,j), распределена в интервале от $-\infty$ до 0, то $-\psi_{ij}=t_{max}(j,i)$ задает распределение длины максимального временного интервала, на протяжении которого работа (i,j) должна быть начата и окончена даже при минимальном насыщении ее определяющим ресурсом. Для этой величины получили ее распределение аналогичного вида (3). Зная распределение случайной величины ψ_{ij} для каждой работы (i,j), по соответствующим формулам вычисляются ее математическое ожидание и дисперсия.

Введение в (1) отрицательно распределенных величин ψ_{ij} для дуг-работ (i,j) существенно расширяет возможности описания временных характеристик работ, делая широко используемую вероятностную модель лишь одним из частных случаев.

Для дуг-связей (i,j) величина ψ_{ij} задает распределение временной зависимости между событиями i и j, причем положительно распределенная величина ψ_{ij} определяет взаимосвязь типа «не ранее» (событие j может наступить не раньше, чем через ψ_{ij} дней после свершения события i), а отрицательно распределенная величина ψ_{ij} определяет взаимосвязь типа «не позднее» (событие i может наступить не позже, чем через $-\psi_{ij}$ дней после свершения события j). В последнем случае такие связи называют «обратными».

Таким образом, здесь мы получили обобщение этих связей с учетом возможно вероятностного их характера.

Так как сроки свершения событий T_i определяются суммой продолжительностей работ, технологически им предшествующих, то при достаточно большом числе таких работ в соответствии с центральной предельной теоремой распределение случайной величины T_i стремится к нормальному с параметрами – математическое ожидание MT_i и дисперсия DT_i. Нормальное распределение имеет и параметр ψ_{ij}, соответствующий «обратным» дугам, что также подтверждается статистическим анализом.

Абсолютные ограничения на сроки свершения событий, заданные (2), отражают соответствующие директивные, организационные и технологические ограничения на сроки выполнения работ или их частей, заданные в «абсолютной» (реальной или условной) шкале времени. Абсолютные ограничения также характеризуются типом «не ранее» или «не позднее» и принимает вид: $T_i - T_0 \geq l_i$, $T_0 - T_i \geq -L_i$. Таким образом, абсолютные

ограничения вида (2) являются частным случаем ограничений вида (1) для определенных дуг-связей.

Введение стохастической матрицы смежности A в сочетании с обобщенными связями дает дополнительные возможности для описания процесса создания сложного проекта.

Пусть L(i,j) – некоторый путь, соединяющий события i и j:

$$L(i,j)=\{i=i_0\to i_1\to i_2\to\ldots\to i_v=j\}. \qquad (4)$$

Этот *путь детерминированный*, если для всех $k\in[1,v]$ справедливо $p_{i_{k-1}i_k}=1$, и *стохастический*, в противном случае. Таким образом, стохастический путь содержит хотя бы одну дугу, вероятность «исполнения» которой строго меньше 1.

Аналогично определяется *детерминированный и стохастический контур* $K(i)=\{i=i_0\to i_1\to i_2\to\ldots\to i_v=i\}$. (такие события i называются «контурными»).

Если события i и j соединены путем L(i,j), то вероятность свершения события j при условии, что событие i произошло P(j/i) есть произведение коэффициентов матрицы смежности A, соответствующих дугам связующего пути:

$$P(j/i)=\Pi^{v}_{k=1}\, p_{i_{k-1}i_k}. \qquad (5)$$

Если события i и j соединены несколькими путями, то выполняется эквивалентное GERT-преобразование данного фрагмента сети в соответствии с приведенными в работе формулами, вычисляется производящая функция $\Psi_{ij}(s)$ преобразованного фрагмента, и вероятность свершения события j при условии, что событие i произошло $P(j/i)=\Psi_{ij}(0)$.

Первая производная функции $\Psi_{ij}(s)/\Psi_{ij}(0)$ по s в точке s=0 (первый момент $\mu_1(j/i)$) определяет математическое ожидание M(j/i) времени свершения события j относительно времени свершения события i. Вторая производная функции $\Psi_{ij}(s)/\Psi_{ij}(0)$ по s в точке s=0 (второй момент $\mu_2(j/i)$) позволяет вычислить дисперсию времени свершения события j относительно времени свершения события i по формуле

$$\sigma^2(j/i)=\mu_2(j/i)-(\mu_1(j/i))^2. \qquad (6)$$

Длина пути L(i,j) есть случайная величина, математическое ожидание которой ML(i,j) есть сумма математических ожиданий длин всех дуг, составляющих данный путь, а дисперсия DL(i,j) равна сумме дисперсий.

При этих условиях длина пути (контура) может принимать *отрицательные* значения, что интерпретируется следующим образом:

если L(i,j)<0 и дуга (j,i) имеет отрицательно распределенный параметр ψ_{ji}, то событие j должно свершиться *не позднее* чем через $-\psi_{ji}$ дней после наступления события i. Параметр ψ_{ji} носит вероятностный характер, что позволяет более гибко (по отношению к ОСМ) описывать логико-временные связи между событиями.

В качестве параметра дуги ψ_{ij} можно рассматривать также любой характерный параметр, который обладает аддитивностью по дугам любого

пути (например, стоимость работы), при этом с помощью эквивалентного GERT-преобразования получим математическое ожидание и дисперсию стоимости фрагмента сети или проекта в целом.

Задачи временного анализа ЦССМ (и алгоритмы их решения) так же, как и временной анализ классических, обобщенных или стохастических сетевых моделей, лежат в основе решения всех задач планирования и управления проектом. Они имеют самостоятельное значение при решении задач управления проектом без учета ограничений на ресурсы.

Задачи временного анализа также необходимы для генерирования различных вариантов плана при определенных значениях вектора наличия ресурсов с целью их последующего сопоставления, оценки качества вариантов плана и выбора направления его дальнейшего улучшения.

При решении задач оптимального планирования работ при управлении проектами алгоритмы временного анализа ЦССМ применяются как инструмент для вычисления необходимых параметров, используемых в соответствующих оптимизационных алгоритмах с целью обеспечения выполнения ограничений технологического характера.

Задача временного анализа ЦССМ сводится к нахождению случайного вектора $T=(T_0,T_1,\ldots,T_n)$, где T_i есть время свершения i-го события, координаты которого удовлетворяют неравенствам (1),(2) и обращают в экстремум некоторую целевую функцию $f(T)$.

Выделены *три класса задач временного анализа*:

- *классические*, в которых для вычисления $\{T_i\}$ используются математические ожидания продолжительностей всех дуг;
- *вероятностные*, в которых на основании предельной теоремы Ляпунова или другими аналитическими средствами вычисляются математические ожидания сроков свершения i–х событий – $\{MT_i\}$, являющиеся аргументами целевой функции $f(T)$;
- *статистические*, в которых для заданного уровня достоверности p по методике, описанной в работе, определяются p-квантильные оценки эмпирических распределений как сроков свершения i-х событий – $\{W_p(T_i)\}$, так и производных от них величин, в том числе и значений целевой функции $f(W_p(T))$, где $W_p(T)=\{W_p(T_0),W_p(T_1),\ldots,W_p(T_n)\}$.

Вводится понятие непротиворечивости ЦССМ.

Циклическая стохастическая сетевая модель называется *непротиворечивой*, если найдется хотя бы один допустимый план, вычисленный для соответствующего класса задач временного анализа (классического, вероятностного или статистического), удовлетворяющий системе неравенств (1),(2).

Разберем эти три понятия.

Классическая непротиворечивость модели.

Вычисляются математические ожидания продолжительностей всех дуг, после чего образуется сеть с постоянными длинами дуг. Учитывая

стохастический характер рассматриваемой модели и наличие обобщенных связей, в ЦССМ после проведенных выше вычислений могут иметь место стохастические и детерминированные контуры. Доказывается следующая теорема:

Теорема 1. Для того, чтобы циклическая стохастическая модель, в которой продолжительности дуг вычислены по классической схеме, была непротиворечивой с заданной вероятностью α, необходимо и достаточно, чтобы длины всех детерминированных контуров были не положительны.

Вероятностная непротиворечивость модели.

Вычисляются аналитическим способом математическое ожидание MT_i и дисперсия σ^2T_i сроков свершения событий. Вычисленные подобным способом параметры на 15-20% отличаются по величине от вычисленных классическим способом (по математическим ожиданиям продолжительностей дуг).

Будем говорить о *вероятностной непротиворечивости модели в среднем*, если полученный таким образом набор удовлетворяет неравенствам (1)-(2), где в качестве значения ψ_{ij} взято ее математическое ожидание. Доказана справедливость следующей теоремы:

Теорема 2. Для того, чтобы циклическая стохастическая модель была вероятностно непротиворечивой в среднем, необходимо и достаточно, чтобы математические ожидания длин всех детерминированных контуров были не положительны.

В предположении, что T_i имеют нормальное распределение с параметрами: математическое ожидание – MT_i и дисперсия – σ^2T_i, введем более широкое понятие *ε-вероятностная непротиворечивость модели.*

Будем говорить, что ЦССМ ε-вероятностно непротиворечива, если существует $\varepsilon > 0$, такое, что для всех T_i, удовлетворяющих неравенству $|T_i - MT_i| < \varepsilon$, справедливы соотношения (1)-(2). В работе доказано следующее:

Теорема 3. Для того, чтобы циклическая альтернативная модель была ε-вероятностно непротиворечивой, необходимо и достаточно, чтобы математические ожидания длин всех детерминированных контуров удовлетворяли соотношению $ML(K(i)) \le -4\varepsilon$.

Вероятностная непротиворечивость модели в среднем является частным случаем ε-вероятностной непротиворечивости при $\varepsilon=0$.

Статистическая непротиворечивость модели.

При статистическом методе расчета параметров сетевой модели мы имеем дело с их p-квантильными оценками значений, которые являются теоретико-вероятностными аналогами соответствующих показателей. Говорится, что циклическая стохастическая модель *статистически непротиворечива с вероятностью p*, если для каждого события i существуют p-квантильные оценки сроков свершения событий $W_p(T_i)$, удовлетворяющие неравенствам:

$$W_p(T_j) - W_p(T_i) \ge W_p(\psi_{ij}), \qquad (7)$$

$$l_i \le W_p(T_i) \le L_i. \qquad (8)$$

Здесь соотношения (7)-(8) являются вероятностными аналогами (1)-(2), $W_p(\psi_{ij})$ есть p-квантильная оценка длины дуги (i,j). Доказано следующее:

Теорема 4. Для того, чтобы циклическая альтернативная модель была статистически непротиворечивой с вероятностью p, необходимо и достаточно, чтобы p-квантильные оценки длин всех детерминированных контуров удовлетворяли соотношению $W_p(L(K(i))) \leq 0$.

Алгоритмы расчета временных параметров ЦССМ.

Планы ранних и поздних сроков.

Для расчета ранних и поздних сроков свершения событий предлагается модифицированный алгоритм «Маятник». Идея модификации заключается в синтезе статистического метода расчета параметров, применяемого для вероятностных сетей, и алгоритма «Маятник», используемого в обобщенных сетях, и последующего применения его для ЦССМ.

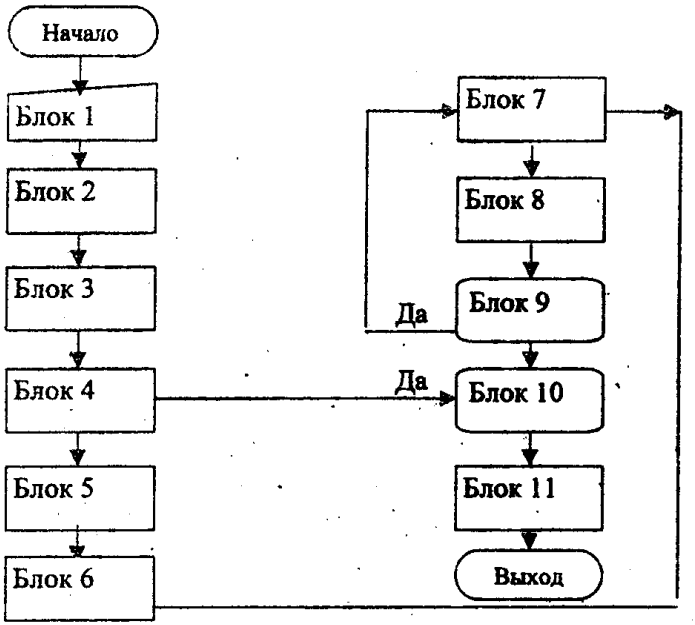

Рис.1. Принципиальная блок-схема алгоритма для расчета p-квантильных оценок *ранних сроков* свершения событий

Блок 1. Ввод исходных данных (коэффициентов матрицы A, параметров распределения ψ_{ij}, уровня достоверности p).

Блок 2. Вычисление необходимого числа «розыгрышей» N для обеспечения заданной точности результатов. Проделанные расчеты показали, что при p=0.95, ε=0.05 получаем N≈270.

Блок 3. v:=v+1 (v – номер «розыгрыша»).

Блок 4. Розыгрыш v-го варианта случайных величин ψ_{ij}, каждой в соответствии с ее законом распределения, получение констант $\psi_{ij}^{(v)}$ – длина дуги (i,j) при v-м розыгрыше.

Блок 5. Розыгрыш для каждой альтернативной вершины i перехода в смежную вершину j (разыгрывается дискретная случайная величина p_{ij}, представленная i-й строкой матрицы смежности A, $0< p_{ij} <1$ и $\sum_j p_{ij} =1$). Выбранная дуга помечается, остальные из графа исключаются. Если в полученном графе образовался контур K(i), содержащий хотя бы одну помеченную дугу, это есть стохастический контур, вычисляем его длину $L^{(v)}K(i)$ и опять для вершины i разыгрываем дискретную случайную величину p_{ij}. В соответствие с доказанной в работе *леммой 1* один и тот же стохастический контур при заданном уровне достоверности p может образоваться не более k раз, где k оценивается по соответствующей формуле. k-кратную длину контура прибавляем к длине дуги, которую мы «разыграли» на (k+1)-м шаге и переходим к анализу другого стохастического контура (если он есть). При этом могут образоваться противоречия в сети (положительные детерминированные контуры), тогда в соответствие с приведенными в работе формулами прибавляем δ-кратную длину контура, оценивая тем самым время свершения «выходного» из контура события в среднем.

Блок 6. Полученную детерминированную обобщенную сеть $G^{(v)}$ разбиваем на две сети $G_1^{(v)}$ и $G_2^{(v)}$, так, чтобы ни $G_1^{(v)}$, ни $G_2^{(v)}$ не содержали контуров. Вершины в сети $G_1^{(v)}$ упорядочиваем по рангам и в соответствие с ними устанавливаем «правильную» нумерацию. Переносим эту нумерацию на сеть $G_2^{(v)}$ и на исходную $G^{(v)}$.

Блок 7. Для всех вершин i сети $G_1^{(v)}$ вычисляем ранние сроки свершения $T_i^{0(v)} := \max_j\{T_i^{0(v)}, T_j^{0(v)} + \psi_{ij}^{(v)}\}$.

Блок 8. Проделываем процедуры, аналогичные блоку 7, для вершин сети $G_2^{(v)}$.

Блок 9. Если результаты блоков 7 и 8 хоть на одном показателе не совпадают, то возвращаемся к блоку 7 (таких возвратов не более, чем число обратных дуг в $G_2^{(v)}$), иначе блок 10.

Блок 10. Если номер розыгрыша $v \le N$, то переходим к блоку 4, иначе к блоку 11.

Блок 11. Из полученной совокупности $\{T_i^{0(v)}\}$ для каждой вершины i строим вариационный ряд. Фиксируем такое значение $T_i^{0(\xi)}$, что $N\xi/N=p$, где $N\xi$ – число членов вариационного ряда, меньших $T_i^{0(\xi)}$. Величина $T_i^{0(\xi)}$ является искомым p-квантилем раннего срока свершения i-го события – $W_p(T_i^0)$. Аналогично, по вариационным рядам $\{\psi_{ij}^{(v)}\}$ строим p-квантильные оценки длин дуг – $W_p(\psi_{ij})$.

На вход блока 6 поступает v-й вариант обобщенной сетевой модели $G^{(v)}$, и, собственно, блоки 6 – 9 представляют собой укрупненную блок-схему алгоритма «Маятник» для вычисления ранних сроков свершения событий в ОСМ. Применяя соответствующий алгоритм для вычисления *поздних сроков* свершения событий в блоках 7 и 8, мы получаем $T_i^{1(v)}$– поздние сроки свершения событий для v-го варианта обобщенной сетевой модели, при этом блок 11 нам дает $W_p(T_i^1)$ – p-квантильные оценки *поздних сроков* свершения событий.

Планы минимальной продолжительности.

Продолжительность $L(T^{(v)})$ любого допустимого плана $T^{(v)}=\{T_i^{(v)}\}$ v-го варианта сети $G^{(v)}$ определяется по формуле:

$$L(T^{(v)})=\max_{ij} |T_i^{(v)} - T_j^{(v)}|. \qquad (9)$$

Заменяя в блок-схеме на рис. 1 блоки 6 – 9 на блок нахождения минимума функции (9), получаем план минимальной продолжительности для сети $G^{(v)}$ (или «сжатый» план). Величина

$$L(T^{*(v)})=\min \max_{ij} |T_i^{(v)} - T_j^{(v)}| \qquad (10)$$

является критическим временем сети $G^{(v)}$.

Используя в блоках 6-9 метод нахождения сжатого плана для ОСМ и пропуская полученные планы через блок 11, получаем вероятностные p-квантильные оценки сжатых планов.

Резервам времени для работы (i,j) соответствуют их p-квантильные аналоги, вычисляемые по формулам:

$R^n_p(i,j)= W_p(T_j^1) - W_p(T_i^0) - W_p(\psi_{ij})$ для *полного резерва*, (11)

$R^c_p(i,j)= W_p(T_j^0) - W_p(T_i^0) - W_p(\psi_{ij})$ для *свободного резерва*. (12)

По соответствующим формулам вычисляются p-квантильные *коэффициенты напряженности* работ $W_p(k_н(i,j))$, затем определяются p-квантильная *критическая зона*, p-квантильная *зона резервов* и p-квантильная *промежуточная зона*.

Постановки и методы решения задач планирования работ при ограниченных ресурсах на базе использования ЦССМ

Математическая модель и метод решения задачи « *Минимизация времени выполнения проекта с постоянной интенсивностью ведения работ при ограничениях на ресурсы*».

Сложный проект представляется циклической стохастической моделью $G(\Omega,A)$, которая описывается системой неравенств (1) – (2), где временные ограничения и продолжительности дуг являются в общем случае случайными величинами. Работы выполняются без разрывов с постоянной скоростью (если v – объем работы, то $\Delta v/\Delta t$=const). Пусть заданы v^k_{ij} – потребность в k-м ($k\in K$) ненакапливаемом ресурсе на работе (i,j), тогда $r^k_{ij}=v^k_{ij}/W_p(\psi_{ij})$ – интенсивность потребления k-го ненакапливаемого ресурса на работе (i,j). Так как интенсивность вычисляется через p-квантильную оценку продолжительности работы, то она имеет вероятностный характер, и все производные от нее также вероятностны. Обозначим $?^k$ – множество работ, потребляющих ресурс k, а $?^k_t$ – множество работ, потребляющих ресурс k в момент времени t ($?^k=\bigcup_{\forall t}\varepsilon^k_t$), тогда общая потребность на всю программу в k-м ресурсе равна $V^k=\sum_{(i,j)\in\varepsilon^k} v^k_{ij}$. Пусть наличие ресурсов в каждый момент времени задано функцией $A^k(t)$.

Обозначая $F^k(t)=\sum_{(i,j)\in\varepsilon^k_t} r^k_{ij}$ – потребность в ресурсе k в момент времени t, получаем математическую постановку задачи оптимального распределения ненакапливаемых ресурсов в виде:

Найти такие сроки начала и окончания работ (i,j) $T_i^*\in[W_p(T_i^0),W_p(T_i^1)]$ и $T_j^*\in[W_p(T_j^0), W_p(T_j^1)]$, что

$T_j^* - T_i^*$? $W_p(\psi_{ij})$, для всех дуг (i, j); (13)

$A^k(t)$? $F^k(t)$, для всех t и k; (14)

$T_n^* \to \min$. (15)

Ограничение (13) отображает требование соблюдения технологической последовательности работ.

Ограничение (14) учитывает ограниченность ресурсов, т.е. в каждый момент времени потребность в ресурсе не должна превышать его наличия.

T_n^* – срок свершения завершающего события.

Аналогичная постановка задачи для накапливаемых ресурсов $\gamma \in \Gamma$ отличается от предыдущей только видом ограничения (14), которое принимает вид:

$$\sum_{t=1}^{\tau} A_\gamma(t) \ ? \sum_{t=1}^{\tau} F_\gamma(t), \text{ для всех } \tau \text{ и } \gamma; \qquad (16)$$

т.е. суммарная потребность в накапливаемом ресурсе γ от начала планового периода к любому моменту τ не должна превышать суммарного объема поставок этого же вида ресурса за соответствующий период.

Для решения сформулированной задачи в работе предложен модифицированный алгоритм «Калибровка», отличия которого от применяемого в обобщенных сетевых моделях заключаются в следующем:

- вместо детерминированных временных параметров (ранние и поздние сроки свершения событий, продолжительности работ и длины дуг) используются их p-квантильные аналоги $W_p(T_j^0)$, $W_p(T_i^1)$, $W_p(\psi_{ij})$, вычисляемые методом имитационного моделирования, описанным выше;
- понятие «обязательных» и «необязательных» работ фронта Φ_t пересекается в теоретико-множественном смысле с понятиями p-квантильных критической, промежуточной и резервной зон, т.е. прежде всего на обслуживание ставятся «обязательные» работы, входящие в p-квантильную критическую зону, затем «обязательные» работы, входящие в p-квантильную промежуточную зону, после чего «обязательные» работы, входящие в p-квантильную резервную зону. «Необязательные» работы фронта Φ_t рассматриваются в соответствие с очередью, установленной по убыванию p-квантильных коэффициентов напряженности $W_p(k_н(i,j))$;
- в результате работы алгоритма получается план $T_p=\{T_i^*\}$ с заданным уровнем достоверности p. При увеличении количества «розыгрышей» N повышается надежность всех p-квантильных оценок и, следовательно, надежность получаемых вариантов плана.

<u>Математическая модель и метод решения задачи</u> *«Минимизация показателя качества потребления ресурсов при заданном времени выполнения проекта с постоянной интенсивностью ведения работ»*.

Оптимальное распределение ресурсов при заданном времени – «сглаживание», является задачей, в которой в качестве критерия оптимальности принимается мера неравномерности потребления ресурсов. Если T – заданное время выполнения программы, то $R^k_{ср}=V^k/T$ – среднее

потребное количество ресурса k в единицу времени. В качестве меры неравномерности потребления ресурса k предлагаются следующие функции:

$$\phi^k_1=\sum\forall_t \left| F^k(t) - R^k_{cp} \right|, \qquad (17)$$

$$\phi^k_2=\sum\forall_t (F^k(t) - R^k_{cp})^2, \qquad (18)$$

$$\phi^k_3=\max_t \left| F^k(t) - R^k_{cp} \right|, \qquad (19)$$

$$\phi^k_4=\max_t F^k(t), \qquad (20)$$

$$\phi^k_5=\sum\forall_t (F^k(t) - A^k(t))^2, \qquad (21)$$

$$\phi^k_6=\sum\forall_t (F^k(t) - A^k(t))\xi^k, \qquad (22)$$

где $\xi^k = \begin{cases} \xi^k_1 - \text{если } (F^k(t) - A^k(t)) > 0, \\ -\xi^k_2 - \text{ если } (F^k(t) - A^k(t)) < 0; \end{cases}$

ξ^k_1 – удельные затраты, связанные с превышением потребности ресурса k над его наличием (для ресурсов типа «мощности» – стоимость сверхурочного времени), ξ^k_2 – удельные затраты, связанные с избыточным наличием ресурса k (для ресурсов типа «мощности» – стоимость простоя исполнителей или оборудования).

Выбор критерия связан со спецификой конкретной системы управления, в работе даются соответствующие рекомендации по выбору критерия.

План выполнения работ проекта, оптимально использующий некоторый ресурс k, может быть весьма далек от оптимального по использованию другого ресурса. В связи с этим рассматриваются целевые функции в виде $f_i=\sum_k \lambda^k \phi^k_i$, где λ^k – весовой коэффициент, характеризующий важность k–го вида ресурса. $k \in K \cup Г$.

Таким образом, математическая модель задачи «сглаживания» принимает вид:

Найти такие сроки начала и окончания работ (i,j) $T_i^* \in [W_p(T_i^0), W_p(T_i^1)]$ и $T_j^* \in [W_p(T_j^0), W_p(T_j^1)]$, что

$$T_j^* - T_i^* \ ?\ W_p(\psi_{ij}), \text{ для всех дуг } (i, j); \qquad (23)$$

$$T_n^* \le T; \qquad (24)$$

$$f_i \to \min. \qquad (25)$$

Для решения сформулированной задачи предлагается модифицированный алгоритм «Сглаживание», отличия которого от применяемого в обобщенных сетевых моделях заключаются в следующем:

- вместо детерминированных временных параметров (ранние и поздние сроки свершения событий, продолжительности работ и длины дуг) используются их p-квантильные аналоги $W_p(T_j^0)$, $W_p(T_i^0)$, $W_p(\psi_{ij})$, вычисляемые методом имитационного моделирования;
- для пересчета плана ранних (или поздних) сроков применяется модифицированный алгоритм «Маятник»;
- по желанию пользователя выбирается один из вариантов целевой функции f_i, i=1,2,…,6. Оптимальные планы, полученные по разным критериям, служат основанием для принятия эффективного решения менеджером проекта;

- работы, попавшие в «пиковые» моменты времени (где функционал f_i принимает максимальное значение), упорядочиваются по убыванию p-квантильных коэффициентов напряженности $W_p(k_н(i,j))$;
- выдвигаются из очереди работы в пределах p-квантильных оценок их резервов, вычисленных по формулам (11)-(12);
- в результате работы алгоритма получается план $T_p=\{T_i^*\}$ с заданным уровнем достоверности p. Увеличивая количество «розыгрышей» N, можно повысить надежность всех p-квантильных оценок и, следовательно, надежность получаемых вариантов плана.

Математическая модель и метод решения задачи «*Распределение ограниченных ресурсов на ЦССМ с переменными интенсивностями работ*».

Выше задачи распределения ограниченных ресурсов на ЦССМ рассматривались при условии постоянной интенсивности выполнения работ. В данной модели рассматривается возможность задания переменной интенсивности выполнения работы, а, следовательно, возможность изменения количества назначаемых на нее ресурсов.

Так как при описании проекта с помощью ЦССМ используются обобщенные связи, позволяющие выделять не только начала и окончания работ в качестве событий, но и промежуточные состояния работ, то нижеприведенная постановка позволяет реализовать две дополнительные возможности:

- выбор интенсивности выполнения всей работы ЦССМ в заданных пределах;
- изменение интенсивности выполнения отдельных частей работы.

Математическая модель задачи распределения ограниченных ресурсов на ЦССМ с переменными интенсивностями работ имеет вид:

Найти такие сроки начала и окончания работ (i,j) $T_i^* \in [W_p(T_i^0), W_p(T_i^1)]$ и $T_j^* \in [W_p(T_j^0), W_p(T_j^1)]$, что

$$T_j^* - T_i^* \ ?\ W_p(\psi_{ij}), \text{ для всех дуг } (i, j); \qquad (26)$$

$$t_{ij}^{min} \le T_j^* - T_i^* \le t_{ij}^{max} \text{ для всех работ или частей работ } (i,j); \qquad (27)$$

$$A^k(t)\ ?\ F^k(t), \text{ для всех } t \text{ и } k; \qquad (28)$$

$$\sum_{\tau=1}^{t} A_\gamma(t)\ ?\ \sum_{\tau=1}^{t} F_\gamma(t), \text{ для всех } \tau \text{ и } \gamma; \qquad (29)$$

$$T_n^* \to \min. \qquad (30)$$

Соотношения (26) задают взаимосвязи между всеми событиями сети, включая дуги-связи, дуги-работы и абсолютные временные ограничения.

Соотношения (27) обеспечивают нахождение переменной продолжительности работы или ее частей в соответствующих границах, определяемых по формулам:

$$t_{ij}^{min(max)} = v^k_{ij} / r^{k\ max(min)}_{ij}, \qquad (31)$$

где $r^{k\ min}_{ij}$ и $r^{k\ max}_{ij}$ – соответственно минимальная и максимальная интенсивности потребления k-го ненакапливаемого ведущего ресурса на работе (i,j),

v_{ij} – трудоемкость выполнения работы (i,j) по ведущему ресурсу k.

В качестве ведущего ресурса выступают только нескладируемые ресурсы (машины, станки, оборудование, исполнители и др.), количество которых, назначенное на работу, определяет ее продолжительность.

Ограничение (28) учитывает ограниченность ненакапливаемых ресурсов, т.е. в каждый момент времени потребность в ресурсе k не должна превышать его наличия.

Ограничение (29) задает условие – суммарная потребность в накапливаемом ресурсе γ от начала планового периода к любому моменту τ не должна превышать суммарного объема поставок этого же вида ресурса за соответствующий период.

Целевая функция (30) обеспечивает построение плана в минимально возможные сроки выполнения проекта.

Решение поставленной задачи на базе ЦССМ обеспечивается модифицированным алгоритмом, суть изменений которого (по отношению к алгоритму для решения аналогичной задачи на базе ОСМ) разберем поэтапно:

Этап 1. Подготовительные процедуры. Временной расчет ЦССМ производим модифицированным алгоритмом «маятник», контроль на непротиворечивость в соответствие с вышеизложенным.

Этап 2. Формирование фронта работ. В качестве ранних сроков свершения событий, являющихся началами работ, берем их р-квантильные оценки $W_p(T_i^{\prime})$.

Этап 3. Формирование очереди. Работы фронтов Φ_t^1 и Φ_t^2 упорядочиваются по убыванию р-квантильных коэффициентов напряженности $W_p(k_н(i,j))$. Выдвигаются из очереди работы в пределах р-квантильных оценок их резервов, вычисленных по формулам (11)-(12).

Этапы 4–6. Назначение ресурсов на работы, изменение интенсивностей их выполнения, выдвижение работ из фронта. Изменения в этих этапах касаются только замены ранних и поздних сроков свершения событий и резервов работ их р-квантильными оценками.

Этап 7. Временной пересчет плана ранних сроков. Производится в соответствие с модифицированным алгоритмом «маятник».

Этап 8. Использование дополнительных ресурсов. Изменения аналогичны этапам 4 – 6.

<u>Математическая модель и метод решения задачи</u> « *Формирование плана минимальной стоимости*».

Обозначим a_{ij} – минимально возможное время выполнения работы (i,j), которому соответствуют затраты c^a_{ij}; b_{ij} – максимально возможное время выполнения работы (i,j), которому соответствуют затраты c^b_{ij}. Величины a_{ij} и b_{ij} определяются исходя из максимальной и минимальной величин ведущего ненакапливаемого ресурса, которые потенциально могут быть задействанны на работе (i,j). Принимая во внимание возможные сбои в работе оборудования, колебания производительности труда исполнителей, а также прочие непредвиденные затраты, полагаем вышеприведенные параметры случайными величинами с заданными законами распределения. Также предполагается, что

ускорение работы связано с дополнительными затратами (на привлечение дополнительной рабочей силы и оборудования, сверхурочные доплаты и т.п.). Имеем

$$a_{ij} \le t_{ij} \le b_{ij},$$
$$c^b_{ij} \le c_{ij} \le c^a_{ij}, \qquad (32)$$

где c_{ij} – затраты, соответствующие времени выполнения t_{ij}.

Задав некоторый уровень значимости p, выполняем имитационное моделирование вышеописанных параметров (учитывая их аддитивность) в соответствие с методом, описанным выше, получая их p-квантильные оценки – $W_p(a_{ij})$, $W_p(b_{ij})$, $W_p(c^a_{ij})$, $W_p(c^b_{ij})$. Анализ некоторых проектов ОКР, реконструкции и строительства сложных объектов показал обоснованность использования для этих параметров бета-распределения при двухоценочной методике.

Полагаем, что зависимость затрат от времени выполнения линейная, т.е.

$$c_{ij} = z_{ij} - y_{ij}t_{ij},$$

откуда, используя (32) для p-квантильных оценок, получаем выражение для p-квантильного коэффициента пропорциональности:

$$y^p_{ij} = (W_p(c^a_{ij}) - W_p(c^b_{ij}))/(W_p(b_{ij}) - W_p(a_{ij})) = \Delta W_p(c_{ij})/\Delta t. \qquad (33)$$

Таким образом, y^p_{ij} с вероятностью p характеризует затраты, связанные с сокращением продолжительности работы (i,j) на единицу времени. Будем называть y^p_{ij} – «p-ценой» сокращения работы на единицу времени.

Если на всех работах принять $t_{ij} = W_p(a_{ij})$, то будет получено наименьшее критическое время $W_p(T^{кр}_{min})$. Этому времени соответствуют наибольшие затраты, равные $W_p(C_a) = \sum\forall_{(i,j)} W_p(c^a_{ij})$.

Если на всех работах принять $t_{ij} = W_p(b_{ij})$, то мы получим сетевой график, которому соответствуют наименьшие затраты, равные $W_p(C_b) = \sum\forall_{(i,j)} W_p(c^b_{ij})$, и наибольшее критическое время $W_p(T^{кр}_{max})$.

При наименьшем критическом времени $W_p(T^{кр}_{min})$ можно уменьшить затраты, если «удлинить» некритические работы за счет полного использования их p-квантильных резервов времени. Ведь увеличение t_{ij} на единицу с вероятностью p снижает ее стоимость на y^p_{ij}. Обозначим полученные затраты через C^p_d, тогда можем утверждать, что для $T^p = W_p(T^{кр}_{min})$ минимальная стоимость равна C^p_d, и, в общем случае, для любого $T^p \in [W_p(T^{кр}_{min}), W_p(T^{кр}_{max})]$ получаем план с минимальными затратами $C(T^p)$. Имея график параметрической зависимости стоимости проекта от продолжительности его выполнения, с одной стороны, определяем минимальную стоимость проекта при любом возможном сроке его выполнения, а с другой стороны, находим минимальную продолжительность выполнения проекта при заданной его стоимости. С помощью функции $C(T^p)$ оцениваем дополнительные затраты, связанные с сокращением сроков завершения проекта.

Если затраты линейно зависят от продолжительности работ, то нахождение $C(T^p)$ сводится к решению задачи линейного программирования вида:

Найти такие продолжительности работ t_{ij}, что

$$W_p(T_j) - W_p(T_i) - t_{ij} ? 0, \text{ для всех работ } (i, j); \quad (34)$$

$$W_p(a_{ij}) \le t_{ij} \le W_p(b_{ij}), \quad (35)$$

$$W_p(T_n^0) \le T, \quad (36)$$

$$C(T) = \sum\nolimits_{(i,j)} c_{ij} = \sum\nolimits_{(i,j)} (z_{ij} - y_{ij}t_{ij}) \to \min, \quad (37)$$

что эквивалентно

$$\sum\nolimits_{(i,j)} y_{ij}t_{ij} \to \max. \quad (38)$$

Для решения этой задачи предложена модификация алгоритма Келли, основанного на использовании теоремы о минимальном разрезе и максимальном потоке. Суть модификации в замене параметров a_{ij}, b_{ij}, c^a_{ij}, c^b_{ij} на их р-квантильные оценки – $W_p(a_{ij})$, $W_p(b_{ij})$, $W_p(c^a_{ij})$, $W_p(c^b_{ij})$. Далее алгоритм используется без изменений.

Таким образом, вышеприведенный модифицированный алгоритм позволяет с заданным уровнем значимости р определять оптимальные варианты финансирования проекта в условиях риска и неопределенности.

В работе приведено также описание особенностей моделирования и решения задач планирования работ для мультипроектов – многоцелевых и многотемных проектов, а также приведена постановка и описан метод решения задачи календарного планирования на базе ЦССМ с использованием DCF-показателей оценки эффективности проектов (чистого дисконтированного дохода (ЧДД) и пр.).

Таким образом, в работе удалось сформировать достаточно полную систему математических моделей и методов реализации задач планирования и управления проектами, что соответствует заявленным целям и задачам данного научного исследования.

Разработанные модели и методы вошли в состав функциональных подсистем многоцелевой системы автоматизации проектирования (САПР), автоматизирующей обоснование проектных вариантов на нескольких этапах градостроительного проектирования. Наличие средств описания и последующего решения задач планирования и управления проектами в условиях риска и неопределенности выполнения ряда работ обеспечивает функционирование САПР (даже при дефиците информации) как экспертной системы, формализующей и автоматизирующей процессы подготовки принятия решений в многофакторных и многокритериальных задачах, позволяющих соотнести затраты на развитие городов и районов с получаемым экономическим эффектом и влиянием на экологическую обстановку.

Данная САПР разрабатывается как многоуровневая система, позволяющая решать многовариантные задачи ТЭО размещения строительства, расселения населения и застройки селитебных территорий, оптимизирующие проектные решения по критериям эффективности использования земель и рационального развития инфраструктур.

В диссертации даны методические рекомендации по практическому применению средств моделирования процессов реализации проектов на базе ЦССМ.

Приводится область применения ЦССМ с учетом разновидностей постановок, вариантов алгоритмов, рассмотренных в работе. Описывается структура и технология подготовки данных для различных уровней управления с учетом проблем достоверности и непротиворечивости информации при ее агрегации и дезагрегации, при этом используется идеология активных систем, в частности адаптивные и встречные процедуры получения исходной информации, методы экспертных оценок при определении параметров сетевых моделей. Результаты исследования вошли в курс лекций «***Математические методы принятия управленческих решений***» по предмету: «Экономико-математическое моделирование» для специальностей 06.08.00 «Экономика и управление», 06.11.00 «Менеджмент». Кроме того, ряд моделей и методов, являющихся частными случаями описанных в работе средств, внедрены в составе более 50 автоматизированных систем управления, в которых автор являлся ответственным исполнителем математического и программного обеспечения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные в диссертационной работе исследования образуют теоретическую и методическую основу решения задач планирования и управления проектами и позволяют сформулировать следующие основные выводы и получить конкретные результаты:

1. С помощью предложенной в работе универсальной модели (ЦССМ) можно учесть альтернативный характер как технологии производства работ, так и способов назначения ресурсов на работы, произвести их оптимальное назначение с оптимальными темпами использования, таким образом, рассмотренные нами методы ресурсно-временного анализа могут эффективно применяться при управлении сложным проектом с учетом риска и неопределенности условий его выполнения.
2. Эти же модели и соответствующие алгоритмы могут быть использованы, если объектом управления является комплекс проектов и если требуется каждый проект в отдельности и комплекс проектов в целом реализовать в максимально сжатые сроки.
3. Построение оптимизированных календарных планов реализации проектов, а также оптимизированного сводного плана для комплекса проектов, произведенное с использованием предложенных моделей и алгоритмов, позволяет определить соответствующие потребности в ресурсах (в том числе финансовых), графики работ исполнителей, использования машин и оборудования.
4. Периодическая актуализация исходных данных дает возможность уточнять эти потребности и графики, тем самым снижать уровень неопределенности и создавать необходимые предпосылки для повышения эффективности реализации проектов в пространстве «время–ресурсы–стоимость».
5. Полученные теоретические результаты – универсальные средства моделирования и алгоритмы решения задач календарного планирования

проектов – позволяют расширить сферу применения методов сетевого моделирования для управления такими проектами, сложность которых обусловлена большим разнообразием технологических зависимостей между отдельными работами, вероятностным характером взаимосвязей и параметров работ, осуществляемых в условиях неопределенности.

6. Комплекс предложенных экономико-математических моделей на базе ЦССМ и алгоритмов решения задач оптимизации расписаний при управлении проектами являются методологической и методической основой разработки функциональных подсистем системы автоматизации проектирования.

Основные положения и результаты работы отражены более чем в 40 научных публикациях. Основные работы по теме диссертации из них следующие:

1. О создании ППП, обеспечивающих применение методов СПУ на базе ЭВМ третьего поколения / И.Б. Рабинович, Т.А. Иванова, Я.Д. Гельруд, Л.М. Генералова //Сб. тезисов докладов I Всесоюзной конференции «Разработка систем математического обеспечения автоматизированных систем управления». – М.: ЦНИИТЭИприборостроения. –1973.– С. 54–55.

2. Рабинович И.Б., Гельруд Я.Д. К вопросу о создании АСУ в строительстве на базе ЭВМ III поколения //Всесоюзный семинар «Системное математическое обеспечение автоматизированных систем в строительстве».-М.: ЦНИПИАСС.– 1973. – С. 27–30.

3. Гельруд Я.Д., Зубер Э.Е., Рабинович И.Б. Проектирование систем математического обеспечения АСУС. –Там же. –С. 31-36.

4. Гельруд Я.Д., Чернова В.К. Об одном комплексе программ, реализующем прогнозирование технико-экономических показателей деятельности строительных организаций Главстроя // Системный анализ промышленного производства: Сб. статей. –Киев: Институт кибернетики. – 1978. –С. 24–29.

5. Разработка и корректировка годовых планов собственного капитального строительства для республиканских министерств и территориальных главков / Ю.Р. Каминец, А.Я. Заславский, Я.Д. Гельруд и др. // Сборник типовых проектных решений задач автоматизированных систем управления в строительстве-М.: ЦНИПИАСС. – 1979: Выпуск первый-С. 17-48.

6. Котов Ю.С., Гельруд Я.Д. Технология проектирования программного обеспечения АСУ в строительстве с использованием средств СУПР-УРАЛ //Сб. научных трудов: Автоматизированные системы управления водохозяйственным строительством. – М.: ВНИИГиМ. –1980. –С. 48–56.

7. Гельруд Я.Д., Любкин С.М., Голенко-Гинзбург Д.И., Гоник А., Ситняковский С. Модели снабжения ресурсами для проектов со случайными параметрами. //Труды международного симпозиума «СОВНЕТ – 99» : Управление проектами: Восток-Запад – грань тысячелетий М. :SOVNET. – 1999. – Декабрь 1–4. Том 1. С. 229–232.

8. Воропаев Б.И., Любкин С.М., Гельруд Я.Д., Резер В.С., Голенко-Гинзбург Д.И. Принятие решений в иерархических системах управления проектами.. – Там же. – С. 291–295.

9. Воропаев В.И., Любкин С.М., Гельруд Я.Д., Титаренко Б.П., Голенко-Гинзбург Д.И. Новые модели и методы для управления проектами. –Там же. – С. 295–312.

10. Любкин С.М., Резер В.С., Гельруд Я.Д., Иванов В.Г., Голенко-Гинзбург Д.И. Гоник А., Ситняковский С. Многоуровневая модель управления проектами со стохастическими параметрами // М.: ВИНИТИ. –1999.–№6 (транспорт; наука; техника; управление). –С. 34–38.
11. Гельруд Я.Д. Циклические альтернативные сетевые модели и методы календарного планирования при управлении проектами //Труды Всероссийской научно-практической конференции: Актуальные проблемы развития экономики России. – Челябинск : ЮУрГУ . – 2000.-24 с.
12. Логиновский О.В., Гельруд Я.Д., Емельянова И.В. Циклическая стохастическая сетевая модель как универсальное средство моделирования задач планирования и управления проектами в социальных и экономических системах. //Сб. научных трудов Международного научно-практического семинара: Вопросы информатизации и управления органов государственной власти и местного самоуправления. –Челябинск, 2000. –27с.

Издательство Южно-Уральского государственного университета

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 24.05.2000. Формат 60*84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1
Тираж 80 экз. Заказ 240/225

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76