

Н.А. ДЕГТЯРЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ**

МОНОГРАФИЯ

Челябинск, 2019

УДК 330.115

ББК 65В641

Д 26

Дегтярева, Н.А. Исследование экономических процессов с применением сетевых моделей : монография / Н.А. Дегтярева. – Челябинск : Изд-во ЗАО «Библиотека А. Миллера», 2019. – 160 с.

ISBN 978 - 5 - 93162 - 211 - 8

В данном исследовании представлены наиболее актуальные проблемы экономико-математического моделирования в области сетевого планирования и управления; представлена теоретическая и методологическая основа исследований с применением сетевых моделей; приведены исследования в области применения сетевых моделей и методов сетевого планирования и управления социально-экономическими процессами в обществе для принятия оптимальных решений.

Рецензенты:

В.Н. Павленко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет».

И.Д. Колмакова, доктор экономических наук, заведующая кафедрой «Государственное и муниципальное управление» ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет».

ISBN 978 - 5 - 93162 - 211 - 8

Дегтярева Н.А., 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ.	9
1.1 Задача сетевого планирования	9
1.2 Этапы развития сетевого планирования.....	13
1.3 Математический аппарат построения сетевых моделей.....	25
1.4 Задачи в сетевой постановке.....	30
ГЛАВА 2. СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ ОПТИМИЗАЦИЯ.....	35
2.1 Основные понятия и правила построения сетевых моделей...	35
2.2 Временные параметры сетевых графиков.....	44
2.3 Анализ и оптимизация сетевой модели	50
2.4 Сетевое планирование в условиях неопределенности.....	58
ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ.....	60
3.1 Применение сетевых моделей для создания опытного образца.....	60
3.2 Применение сетевых моделей в условиях неопределенности.	66
3.3 Применение сетевых моделей для выполнения проекта проведения строительно-монтажных работ.....	68
3.4 Программная реализация задач сетевого планирования.....	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	89
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	94
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	104

ВВЕДЕНИЕ

Сетевое планирование и управление (СПУ) является одним из методов научного анализа и контроля. Сетевое планирование получило широкую известность в мировой практике под названием системы PERT (метод оценки и обзора программы), или СРМ (метод критического пути), по названию двух начальных вариантов сетевого планирования, разработанных в США в конце 50-х годов. Система PERT, или Program Evaluation Task, была использована ее американскими создателями для проведения программы исследовательских и конструкторских работ, связанных с созданием известной ракеты «Поларис»[9].

В России работы по сетевому планированию начались в 60-х годах и нашли применение в строительстве и научных работах. В дальнейшем сетевые методы стали широко применяться и в других областях народного хозяйства. Широко известны труды Антоновичуса К. А., Афанасьева В. А., Русакова А. А., Лейбмана Л. Я., Михельсона В. С., Панкратова Ю. П., Рыбальского В. И., Смирнова Т. И., Цоя Т. Н. и других.

К концу 60-х годов система СПУ сформировалась как комплекс расчетных методов, организационных мероприятий и контрольных приемов, обеспечивая средства динамического и координированного представления и анализа сложных производственных и непроизводственных программ. Конечным продуктом действия системы являются: выявление и мобилизация резервов времени и материальных ресурсов, появляющихся при рациональном организации процессов; осуществление управления проектом или программой по принципу «ведущего звена» с прогнозированием и предупреждением возможных сбоев в ходе программы, улучшение показателей планируемой

программы; повышение эффективности управления в целом при четком распределении ответственности между руководителями разного уровня и ответственными исполнителями [6].

Методы сетевого планирования и управления актуальны и в настоящее время, потому что они имеют:

- наилучшее, по сравнению с другими методами, отражение всей структуры реализации проекта (дерева решений проекта) и всех связей между работами и операциями;
- наглядность и высокую информативность, позволяющую «увидеть» каждую работу и любой путь в возможной динамике событий;
- возможность быстрого нахождения ошибок в организации работ по реализации проекта и фактическое снижение рисков;
- наличие критического пути, позволяющего концентрировать внимание на «узких местах», а также путей, которые приближаются к критическим и могут стать таковыми;
- возможность эффективного распределения и перераспределения трудовых, финансовых и прочих ресурсов;
- возможность разыгрывать варианты вероятного развития событий в будущем и находить оптимальную стратегию управления риском реализации как проекта в целом, так и его частей;
- возможность эффективного применения вычислительной техники для выполнения расчетов и внесения корректировок;
- возможность создания в рамках реализации проекта комплексной системы планирования, включающей совокупность взаимно сопряженных планов различного уровня;
- возможность «сшивания» сетей отдельных проектов в общую программу.

Наиболее распространенными направлениями применения сетевого планирования являются:

- целевые научно-исследовательские и проектно-конструкторские разработки сложных объектов, машин и установок, в создании которых принимают участие многие предприятия и организации;
- планирование и управление основной деятельностью разрабатывающих организаций;
- планирование комплекса работ по подготовке и освоению производства новых видов промышленной продукции;
- строительство и монтаж объектов промышленного, культурно-бытового и жилищного назначения;
- реконструкция и ремонт действующих промышленных и других объектов;
- планирование подготовки и переподготовки кадров, проверка исполнения принятых решений, организация комплексной проверки деятельности предприятий, объединений, строительномонтажных организаций и учреждений [8].

Методы сетевого планирования используются при планировании сложных комплексных проектов, таких как:

- строительство и реконструкция каких-либо объектов;
- выполнение научно-исследовательских и конструкторских работ;
- подготовка производства к выпуску продукции;
- перевооружение армии;
- развертывание системы медицинских или профилактических мероприятий [9].

СПУ основано на моделировании процесса с помощью сетевого графика и представляет собой совокупность расчетных методов, организационных и контрольных мероприятий по планированию и управлению комплексом работ [20]. Под комплексом понимают всякую задачу, для выполнения которой необходимо осуществить достаточно большое количество разнообразных работ. Для того чтобы составить план работ по осуществлению больших и сложных проектов, состоящих из тысяч отдельных исследований и операций, необходимо описать его с помощью некоторой математической модели. Таким средством описания проектов является сетевая модель. Сетевая модель — это план выполнения некоторого комплекса взаимосвязанных работ, заданного в форме сети, графическое изображение которой называется сетевым графиком. Главными элементами сетевой модели являются работы и события. Термин «работа» в СПУ имеет несколько значений. Во-первых, это действительная работа — протяжённый во времени процесс, требующий затрат ресурсов (например, сборка изделия, испытание прибора и т.п.). Каждая действительная работа должна быть конкретной, чётко описанной и иметь ответственного исполнителя. Во-вторых, это ожидание — протяжённый во времени процесс, не требующий затрат труда (например, процесс сушки после покраски, старения металла, твердения бетона и т.п.). В-третьих, это зависимость, или фиктивная работа — логическая связь между двумя или несколькими работами (событиями), не требующими затрат труда, материальных ресурсов.

Достоинства сетевых графиков [21]:

1. Устанавливается вся совокупность связей между отдельными работами.
2. Выявляются работы, определяющие продолжительность строительства объектов или их комплекса (работы критического пути).

3. Обеспечивается наглядное представление о технологической и организационной последовательности работ.

4. Создаются условия для прогнозирования хода строительства. При различных отклонениях от графика имеется возможность предвидеть дальнейший ход строительства и определить вероятную его продолжительность.

5. Руководство строительством получает возможность сосредоточить основное внимание и усилие на работах, от выполнения которых в данный момент зависит срок сдачи объектов в эксплуатацию, и принять меры для обеспечения своевременного завершения работ.

6. Не требуется многократно составлять сетевой график при изменении условий на строительстве объектов, если принятые при разработке графика технологические организационные схемы выполнения работ остаются неизменными.

7. В процессе составления расчета сетевых графиков активно участвуют исполнители работ (от мастера до начальника строительной организации), что позволяет использовать опыт большого количества специалистов.

8. Сетевые графики допускают использование вычислительной техники.

ГЛАВА I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

1.1 Задача сетевого планирования

Сетевое планирование – метод управления, который основывается на использовании математического аппарата теории графов и системного подхода для отображения и алгоритмизации комплексов взаимосвязанных работ, действий или мероприятий для достижения четко поставленной цели [1].

Сетевое планирование позволяет определить, во-первых, какие работы или операции из числа многих, составляющих проект, являются «критическими» по своему влиянию на общую календарную продолжительность проекта и, во-вторых, каким образом построить наилучший план проведения всех работ по данному проекту с тем, чтобы выдержать заданные сроки при минимальных затратах.

Сетевое планирование основывается на разработанных практически одновременно и независимо методе критического пути (СРМ – Critical Path Method) и методе оценки и пересмотра планов (PERT – Program Evaluation and Review Technique) [2].

Методы сетевого планирования применяются для оптимизации планирования и управления сложными разветвленными комплексами работ, требующими участия большого числа исполнителей и затрат ограниченных ресурсов.

Основная цель сетевого планирования – сокращение до минимума продолжительности проекта.

Задача сетевого планирования состоит в том, чтобы графически, наглядно и системно отобразить и оптимизировать последовательность и взаимозависимость работ, действий или мероприятий, обеспечивающих своевременное и планомерное достижение конечных целей. Для

отображения и алгоритмизации тех или иных действий или ситуаций используются экономико-математические модели, которые принято называть сетевыми моделями, простейшие из них – сетевые графики. С помощью сетевой модели руководитель работ или операции имеет возможность системно и масштабно представлять весь ход работ или оперативных мероприятий, управлять процессом их осуществления, а также маневрировать ресурсами.

Важная особенность СПУ (сетевого планирования и управления) заключается в системном подходе к вопросам организации управления, согласно которому коллективы исполнителей, принимающие участие в комплексе работ и объединенные общностью поставленных перед ними задач, несмотря на разную ведомственную подчиненность, рассматриваются как звенья единой сложной организационной системы.

Использование методов сетевого планирования способствует сокращению сроков создания новых объектов на 15-20%, обеспечению рационального использования трудовых ресурсов и техники.

В основе сетевого планирования лежит построение сетевых диаграмм. Сетевая диаграмма (сеть, граф сети, PERT-диаграмма) – графическое отображение работ проекта и зависимостей между ними. В СПУ под термином "сеть" понимается полный комплекс работ и вех проекта с установленными между ними зависимостями.

Выделяют два типа сетевых диаграмм – сетевая модель типа "вершина-работа" и "вершина-событие" или "дуги-работы".

Сетевые диаграммы первого типа отображают сетевую модель в графическом виде как множество вершин, соответствующих работам, связанных линиями, представляющими взаимосвязи между работами. Так же этот тип диаграмм называют диаграммой предшествования – следования (рис 1).



Рисунок 1- Фрагмент сети «вершина-работа»

Другой тип сетевой диаграммы – сеть типа «вершина-событие». При данном подходе работа представляется в виде линии между двумя событиями (узлами графа), которые, в свою очередь, отображают начало и конец данной работы. PERT-диаграммы являются примерами этого типа диаграмм (рис 2) [2].

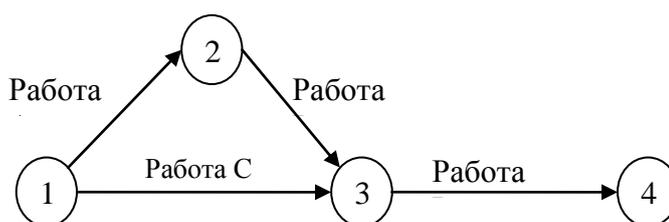


Рисунок 2 - Фрагмент сети «вершина-событие»

Методы сетевого планирования используются при планировании сложных комплексных проектов, например, таких как:

- строительство и реконструкция каких-либо объектов;
- выполнение научно-исследовательских и конструкторских работ;

- подготовка производства к выпуску продукции;
- перевооружение армии;
- развертывание системы медицинских или профилактических мероприятий [9].

Система СПУ позволяет:

1. формировать календарный план реализации некоторого комплекса работ;
2. выявлять и мобилизовывать резервы времени, трудовые, материальные и денежные ресурсы;
3. осуществлять управление комплексом работ по принципу "ведущего звена" с прогнозированием и предупреждением возможных срывов в ходе работ;
4. повышать эффективность управления в целом при четком распределении ответственности между руководителями разных уровней и исполнителями работ.

Система сетевого планирования и управления является комплексом расчетных алгоритмов, организационных мероприятий, контрольных и координационных приемов. Она представляет собой средство динамического и сбалансированного представления и анализа сложных социально-экономических систем. Целями функционирования системы являются: выявление и мобилизация резервов времени и материальных ресурсов, скрытых в рациональной организации социально-экономических процессов; осуществление управления программой с постоянной концентрацией внимания на решении главных, наиболее значимых задач; прогнозирование и предупреждение возможных сбоев в ходе программы; повышение эффективности управления в целом при четком распределении ответственности между руководителями разных уровней

1.2 Этапы развития сетевого планирования

Первый этап широкого использования сетевого планирования был связан с появлением диаграмм Ганта, которые появились в начале двадцатого века. Диаграмма Ганта это удобный инструмент для организации, планирования и управления ходом выполнения самых разнообразных процессов [10].

Диаграмма Ганта является одним из наиболее распространенных способов наглядного представления производственного процесса или проекта во времени. Диаграмма Ганта – горизонтальная линейная диаграмма, на которой задачи проекта представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания, задержками и, возможно, другими временными параметрами.

Диаграмма Ганта представляет собой график, в котором процесс представлен в двух видах. В левой части проект представлен в виде списка задач (работ, операции) проекта в табличном виде с указанием названия задачи и длительности ее выполнения, а часто и работ, предшествующих той или иной задаче. В правой части каждая задача проекта, а точнее длительность ее выполнения, отображается графически, обычно в виде отрезка определенной длины [10] (рис. 3).



Рисунок 3 - Диаграмма Ганта

В верхней, правой части диаграммы Ганта располагается шкала времени. Длина отрезка и его расположение на шкале времени определяют время начала и окончания каждой задачи. Кроме того, взаимное расположение отрезков задач показывает, следуют ли задачи одна за другой или происходит их параллельное выполнение.

Наиболее широко график Ганта использовался в строительстве. В качестве расписания работ график Ганта вполне пригоден, но когда возникает необходимость изменения структуры работ, приходится все работы пересматривать заново, учитывая все многообразие возможных технологических связей между ними. И чем сложнее работы, тем сложнее использовать график Ганта. Тем не менее, даже после появления сетевых моделей график Ганта продолжает использоваться как средство представления временных аспектов работ на конечных стадиях календарного планирования, когда продолжительность проекта оптимизирована с помощью сетевых моделей. График Ганта может также использоваться для элементарного контроля работ. Он используется для отражения текущего состояния проекта (статуса проекта) с точки зрения соблюдения сроков [7].

Циклограмма представляет собой линейную диаграмму продолжительности работ, которая отображает работы в виде наклонной линии в двухмерной системе координат, одна ось которой изображает время, а другая – объемы или структуру выполняемых работ.

Циклограммы активно использовались до 80-х годов XX века в основном в строительной отрасли, особенно при организации поточного строительства. Существуют циклограммы ритмичного и неритмичного потока. (рис.5, рис. 6). Равноритмичным потоком называют такой поток, в котором все составляющие потоки имеют единый ритм, т.е. одинаковую продолжительность выполнения работ на всех захватках [7].



Рисунок 5 - Равноритмичная циклограмма



Рисунок 6 - Циклограмма неритмичного потока

В настоящее время циклограммы практически не используются в управленческой практике как по причине недостатков, указанным ниже, так и по причине неактуальности поточного строительства.

Эти модели просты в исполнении и наглядно показывают ход работы. Однако они не могут отразить сложности моделируемого процесса – форма модели вступает в противоречие с ее содержанием. Основными недостатками являются:

- отсутствие наглядно обозначенных взаимосвязей между отдельными работами (зависимость работ, положенная в основу графика, выявляется только один раз в процессе составления графика (модели) и

фиксируется как неизменная; в результате такого подхода заложенные в графике технологические и организационные решения принимаются обычно как постоянные и теряют свое практическое значение после начала их реализации);

- негибкость, жесткость структуры линейного графика, сложность его корректировки при изменении условий (необходимость многократного пересоставления графика, которое, как правило, из-за отсутствия времени не может быть выполнено);

- невозможность четкого разграничения ответственности руководителей различных уровней (информация, поступившая о ходе разработки, содержит в себе на любом уровне слишком много сведений, которые трудно оперативно обработать);

- сложность вариантной проработки и ограниченная возможность прогнозирования хода работ [7].

Второй этап. Методики сетевого планирования были разработаны в конце 50-х годов в США. В 1956 г. М. Уолкер из фирмы "Дюпон", исследуя возможности более эффективного использования принадлежащей фирме вычислительной машины Univac, объединил свои усилия с Д. Келли из группы планирования капитального строительства фирмы "Ремингтон Рэнд". Они попытались использовать ЭВМ для составления планов-графиков крупных комплексов работ по модернизации заводов фирмы "Дюпон". В результате был создан рациональный и простой метод описания проекта с использованием ЭВМ. Первоначально он был назван методом Уолкера-Келли, а позже получил название метода критического пути (или СРМ – Critical Path Method) [1].

Метод критического пути позволяет рассчитать возможные календарные графики выполнения комплекса работ на основе описанной логической структуры сети и оценок продолжительности выполнения каждой работы, определить критический путь для проекта в целом.

В основе метода лежит определение наиболее длительной последовательности задач от начала проекта до его окончания с учетом их взаимосвязи.

Метод критического пути исходит из того, что длительность операций можно оценить с достаточно высокой степенью точности и определенности.

Основным достоинством метода критического пути является возможность манипулирования сроками выполнения задач, не лежащих на критическом пути.

Конечным результатом применения метода критического пути (СРМ) будет построение временного графика выполнения проекта. Для этого проводятся специальные вычисления, в результате чего получаем следующую информацию:

- Общая длительность выполнения проекта.
- Разделение множества процессов, составляющих проект, на критические и не критические.

Процесс является критическим, если он не имеет "зазора" для времени своего начала и завершения. Таким образом, чтобы весь проект завершился без задержек, необходимо, чтобы все критические процессы начинались и заканчивались в строго определенное время. Для не критического процесса возможен некоторый "дрейф" времени его начала, но в определенных границах, когда время его начала не влияет на длительность выполнения всего проекта [8].

Наиболее ранний возможный срок появления события

Для проведения необходимых вычислений определим событие как точку на временной оси, где завершается один процесс и начинается другой. В терминах сети, событие – это сетевой узел. Нам понадобятся также следующие определения и обозначения.

$T_j(E)$ – наиболее ранний возможный срок наступления j -ого события,

$j = 1, 2, \dots, n$, где n – число событий (узлов) в сети;

d_{ij} – длительность процесса j и i .

Поскольку j -е событие не может произойти, пока не будут завершены все работы, ведущие к j -му узлу, и поскольку работа не может начаться, пока не произойдет предшествующие ей событие, наиболее ранний возможный срок наступления каждого события вычисляется как продолжительность самого длинного пути от начального до данного события.

Допустим, что от начального события (события 1) к j -му событию ведут r путей. Обозначим эти пути $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_r$. Каждому пути соответствует некоторая мера, равная сумме продолжительности всех работ на данном пути. Следовательно,

$$T_j(\Pi_k) = \sum_m \sum_p d_{mp}, \quad m, p \in \Pi_k, \quad k = 1, 2, \dots, r, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Таким образом, самый длинный путь от начального узла (узел 1) до j -ого узла определяется как:

$$T_j(E) = \max_k [T_j(\Pi_k)]; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

где максимум берется по всем путям, соединяющим узлы 1 и j .

Удобно принять $T_1(E) = 0$ (самый длинный путь к первому узлу равен нулю). Рассмотрим теперь все работы, ведущие к последующему событию. Вычисляем для каждой такой работы время, равное наиболее раннему возможному сроку наступления предыдущего события плюс продолжительность работы. Поскольку последующее событие не может появиться до завершения всех предшествующих работ, наиболее ранний возможный срок наступления рассматриваемого события равен максимуму

этих двух различных промежутков времени. Иными словами, самый ранний возможный срок наступления j -го события определяется как:

$$T_j(E) = \max_{i < j} [T_i(E) + d_{ij}], 2 \leq j \leq n$$

где максимум берется по всем работам, завершающимся в j -м узле и выходящим из любого предшествующего j -го узла. Для сети с n событиями, $j=1, 2, \dots, n$, вычисления продолжаются до тех пор, пока не будет определен наиболее ранний возможный срок наступления завершающего n -го события [9].

Параллельно и независимо в военно-морских силах США был создан метод оценки и пересмотра плана PERT (Program Evaluation and Review Technique). Данный метод был разработан корпорацией "Локхид" и консалтинговой фирмой "Буз, Аллен энд Гамильтон" для реализации проекта разработки ракетной системы "Поларис", который объединял около 3800 основных подрядчиков и состоящего из 60 тыс. операций. Использование метода PERT позволило руководству программы точно знать, что требуется делать в каждый момент времени и кто именно должен это делать, а также вероятность своевременного завершения отдельных операций. Проект удалось завершить на два года раньше запланированного срока благодаря успешному руководству программы.

Данный метод управления начал использоваться во всех вооруженных силах США для планирования проектов. Эта методика использовалась при координации работ, выполняемых различными подрядчиками в рамках крупных проектов по разработке новых видов вооружения.

Так же, эта методика управления нашла применение для разработки новых видов продукции и модернизации производства крупными промышленными корпорациями, а так же в строительстве.

Примером успешного применения сетевого планирования проектов можно назвать сооружение гидроэлектростанции на реке Черчилль в Ньюфаундленде (полуостров Лабрадор) с 1967 по 1976 г. В 1974 году ход работ по проекту опережал расписание на 18 месяцев и укладывался в плановую оценку затрат. Следует отметить, что значительный выигрыш по времени образовался благодаря применению точных математических методов в управлении сложными комплексами работ, что стало возможным благодаря развитию вычислительной техники. Однако первые ЭВМ были дороги и доступны только крупным организациям. Таким образом, исторически первые проекты представляли собой грандиозные по масштабам работ, количеству исполнителей и капиталовложениям государственные программы.

Третий этап связан как с продолжавшимся в конце двадцатого века усовершенствованием прежних методов управления проектами, так и с появлением новых, но на более качественном уровне – с применением современного программного обеспечения и персональных компьютеров. Сначала разработка программного обеспечения велась крупными компаниями с целью поддержки собственных проектов, но вскоре первые системы управления проектами появились и на рынке программного обеспечения. Системы, стоявшие у истоков планирования, разрабатывались для мощных больших компьютеров и сетей мини-ЭВМ [10].

С появлением персональных компьютеров начался этап наиболее бурного развития систем для управления проектами. Расширился круг пользователей управленческих систем, что привело к необходимости

создания систем для управления проектами нового типа. Причем одним из важнейших показателей таких систем являлась простота использования. Поэтому при дальнейших разработках новых версий разработчики старались сохранить внешнюю простоту систем, расширяли их функциональные возможности и мощность, и при этом сохраняли низкие цены, делавшие системы доступными фирмам практически любого уровня.

В настоящее время сложились глубокие традиции использования информационных систем управления проектами во многих областях жизнедеятельности [22]. Увеличение числа пользователей систем проектного менеджмента способствует расширению методов и приемов их использования. Западные отраслевые журналы регулярно публикуют статьи, посвященные системам для управления проектами, включающие советы пользователям таких систем и анализ использования методики сетевого планирования для решения задач в различных сферах управления.

Если о продолжительности каких-то работ заранее нельзя задать однозначно или если могут возникнуть ситуации, при которых изменяется запланированная заранее последовательность выполнения задач проекта, например, существует зависимость от погодных условий, ненадежных поставщиков или результатов научных экспериментов, детерминированные модели неприменимы. Чаще всего такие ситуации возникают при планировании строительных, сельскохозяйственных или научно-исследовательских работ. В этом случае используются вероятностные модели, которые делятся на два типа:

- неальтернативные – если зафиксирована последовательность выполнения работ, а продолжительность всех или некоторых работ характеризуется функциями распределения вероятности [11];

- альтернативные – продолжительности всех или некоторых работ и связи между работами носят вероятностный характер [11].

К наиболее распространенным методам вероятностного сетевого планирования относятся: метод критического пути (СРМ); метод оценки и пересмотра планов (PERT), а также метод имитационного моделирования или метод Монте-Карло и метод графической оценки и анализа (GERT).

Рассмотрим метод имитационного моделирования (метод Монте-Карло) - это численный метод решения математических задач при помощи моделирования случайных величин [10]. Создателями этого метода считают английских математиков Дж. Неймана и С. Улама, которые анонсировали данный метод в статье The Monte Carlo method, J. Amer. statistical assoc., 1949. Название метода происходит от города в княжестве Монако, знаменитого своим игорным домом, так как одним из простейших механических приборов для получения случайных величин является рулетка [10].

Суть данного метода состоит в том, что результат испытания зависит от значения некоторой случайной величины, распределенной по заданному закону. Поэтому результат каждого отдельного испытания также носит случайный характер. Проведя серию испытаний, получают множество частных значений наблюдаемой характеристики (выборку). Полученные статистические данные обрабатываются и представляются в виде численных оценок интересующих исследователя величин (характеристик системы).

Важной особенностью данного метода является то, что его реализация практически невозможна без использования компьютера [17].

Метод Монте-Карло имеет две особенности [10]:

- простая структура вычислительного алгоритма;
- погрешность вычислений, как правило, пропорциональна D/N , где D – некоторая постоянная, N – число испытаний. Отсюда видно, что для того, чтобы уменьшить погрешность в 10 раз (иначе говоря, чтобы получить в ответе еще один верный десятичный знак), нужно увеличить N (т.е. объем работы) в 100 раз [14].

Добиться высокой точности таким путем невозможно. Поэтому обычно говорят, что метод Монте-Карло особенно эффективен при решении тех задач, в которых результат нужен с небольшой точностью (5-10%). Способ применения метода Монте-Карло довольно прост. Чтобы получить искусственную случайную выборку из совокупности величин, описываемой некоторой функцией распределения вероятностей:

1. задаются пределы изменения времени реализации каждой операции;
2. задаются конкретные времена реализации для каждой операции с помощью датчика случайных чисел;
3. рассчитывается критический путь и время реализации всего проекта;
4. переход на операцию "2".

Результатом применения метода Монте-Карло является:

- гистограмма, которая показывает вероятность времени реализации проекта;
- индекс критичности.

Рассмотрим метод графической оценки и анализа (метод GERT), который применяется в тех случаях организации работ, когда последующие задачи могут начинаться после завершения только некоторого числа из предшествующих задач, причем не все задачи,

представленные на сетевой модели, должны быть выполнены для завершения проекта.

Основу применения метода GERT составляет использование альтернативных сетей, называемых в терминах данного метода GERT-сетями.

GERT - сеть имеет следующие свойства:

- сеть состоит из узлов, реализующих логические функции, и направленных ветвей. Узлам соответствуют события или цели проекта. Ветвям соответствуют работы (операции) проекта и (или) процессы передачи определенной информации. Логические функции предназначены для моделирования взаимосвязей выполнения работ и реализации событий;

- выделяют узел источник, как правило, предназначенный для описания момента начала выполнения работ по проекту и один или несколько узлов стоков, предназначенных для описания моментов завершения проекта (этапа проекта);

- под реализацией стохастической сети понимается реализация определенной совокупности ветвей и узлов, достаточной для достижения цели проекта (реализации задаваемого определенного набора узлов стоков) [15].

По существу GERT - сети позволяют более адекватно задавать сложные процессы строительного производства в тех случаях, когда затруднительно или невозможно (по объективным причинам) однозначно определить какие именно работы и в какой последовательности должны быть выполнены для достижения намеченного результата (т.е. существует многовариантность реализации проекта).

Следует отметить, что "ручной" расчет GERT - сетей, моделирующих реальные процессы, чрезвычайно сложен, однако программное обеспечение для вычисления сетевых моделей такого типа в настоящее время, к сожалению, не распространено [15].

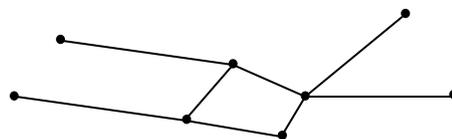
1.3 Математический аппарат сетевых моделей

Для того чтобы составить план работы по осуществлению больших и сложных проектов, состоящих из тысяч отдельных исследований и операций, его описывают с помощью некоторой математической модели [27, 33, 35]. Таким средством описания проектов (комплексов) является сетевая модель [6].

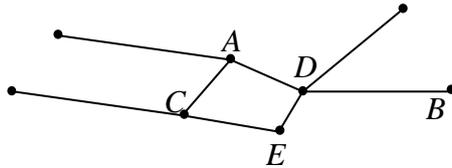
В основе сетевого планирования лежит представление структуры управляемого процесса в виде специального графа называемого сетевой моделью или сетью.

Математический аппарат сетевых моделей базируется на теории графов [41].

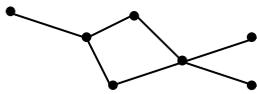
Графом называется фигура, состоящая из точек (вершин) и соединяющих их линий (ребер):



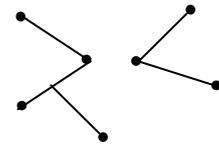
Маршрутом (путем) в графе, соединяющим вершины A и B , называется такая последовательность его ребер, в которой каждые два ребра имеют общую концевую точку, причем первое ребро выходит из вершины A , а последнее входит в вершину B (например, ADB или $ACEDB$ и т.д.).



Граф называется связанным, если для любых двух его вершин может быть указан маршрут, по которому из одной вершины можно попасть в другую; в противном случае граф называется несвязанным.

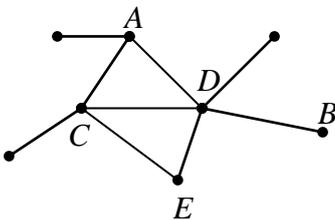


Связанный граф



Несвязанный граф

Цепью называется маршрут, не содержащий повторяющихся ребер. Вершины в цепи могут повторяться несколько раз.

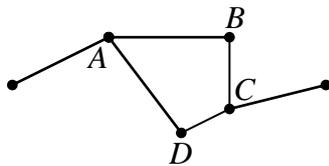


Маршрут $ADCEDB$ - цепь.

Маршрут $ACDECDB$ - не является цепью.

Вершина C - четна; вершина D - нечетна.

Цепь, начальная и конечная вершины которой совпадают, называется циклом.



Цепь $ABCD A$ - цикл.

Вершина называется четной, если в ней сходится четное число ребер, и нечетной, если сходящихся в ней число ребер нечетно.

Степенью (порядком) вершины называется число сходящихся в ней ребер.

Конечным графом называется граф с конечным числом ребер.

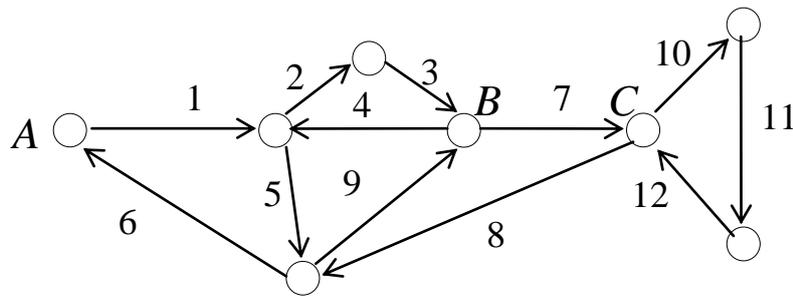
Граф, все вершины которого четны, называется эйлеровым графом.

Теорема Эйлера. В любом конечном связном графе, все вершины которого четны, существует цикл, в котором каждое ребро графа участвует ровно один раз. Такой цикл называется эйлеровым циклом.

1 цикл – 1, 2, 3, 4, 5, 6.

2 цикл – 7, 8, 9.

3 цикл – 10, 11, 12.



Цикл 1, 2, 3, 7, 10, 11, 12, 8, 9, 4, 5, 6 – эйлеров цикл, в который входят все ребра графа.

Гамильтоновым называется цикл, если он проходит через каждую вершину графа ровно по одному разу. Если заданный граф допускает гамильтонов цикл, то он называется гамильтоновым графом (рис. 7).

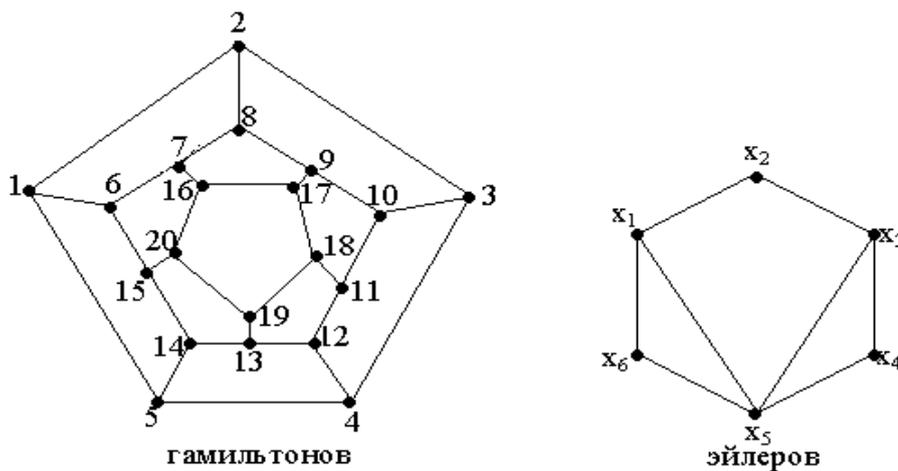
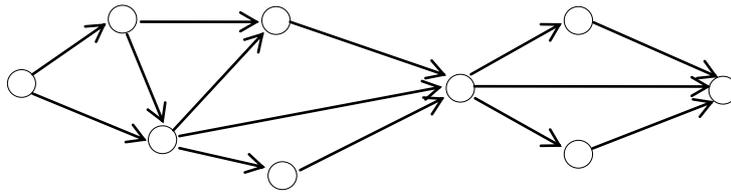


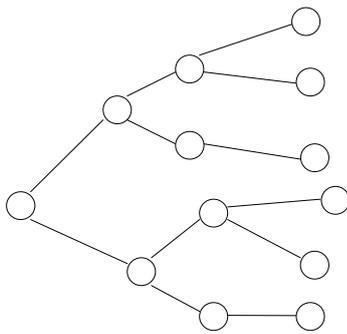
рис. 7

Орграфом называется граф, у которого ориентированы ребра, т.е. указаны начало и конец каждого из них.

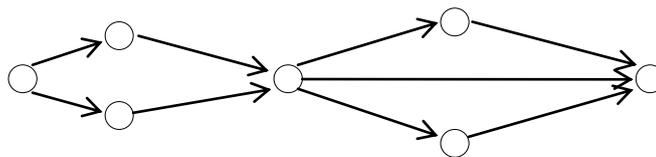


В экономике чаще всего используется два вида графов: дерево и сеть.

Деревом называется связный граф, не имеющий циклов. Дерево имеет исходную вершину (корень) и крайние вершины; пути от исходной вершины к крайним вершинам называются ветвями.



Сеть – ориентированный конечный связанный граф, имеющий начальную вершину (источник) и конечную вершину (сток).



В экономических приложениях граф обычно называется сетью или сетевым графиком.

Сетевые графики (модели) - ориентированные графы (орграфы), дугам (ребрам) и вершинам которых приписаны числовые значения.

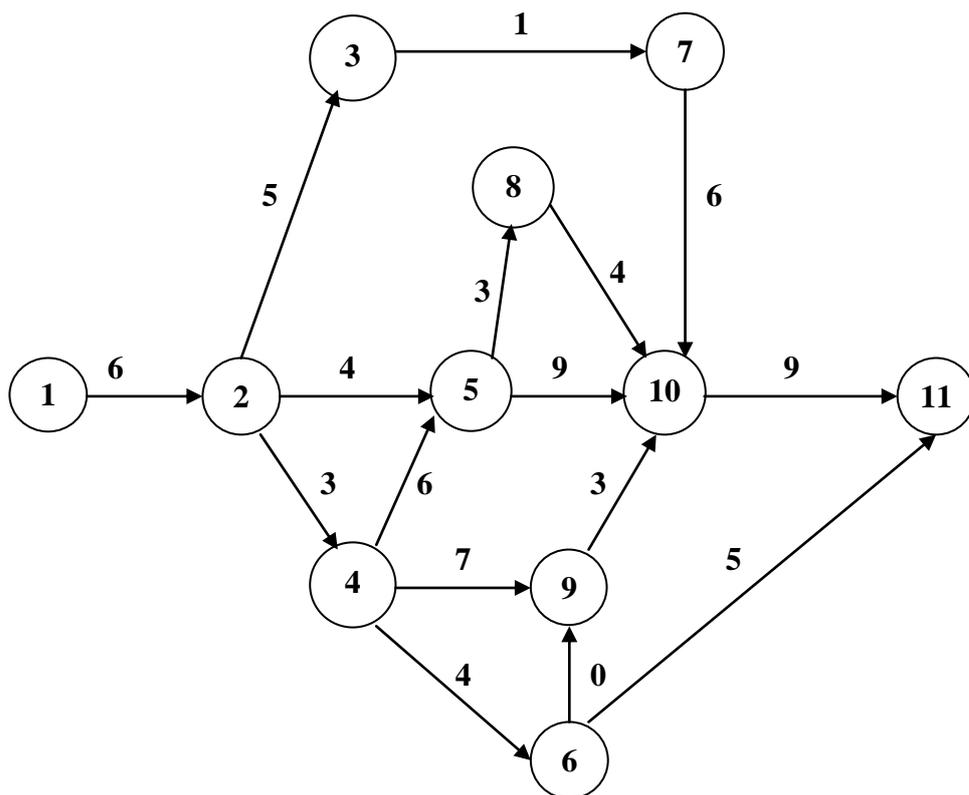


Рисунок 8 – Сетевая модель

На рисунке 8 графически представлена сетевая модель, состоящая из 11 событий и 16 работ, продолжительность выполнения которых указана над работами.

Таким образом, основой сетевого планирования и управления является сетевая модель (график), описывающая объект управления в виде сетевого графика. Сетевой моделью (сетевой график, сеть) называется экономико-математическая модель, отражающая комплекс работ (операций) и событий, связанных с реализацией некоторого проекта (научно-исследовательского, производственного и др.) в их логической и технологической последовательности и связи.

1.4 Задачи в сетевой постановке

Для определения оптимального управления объектами (комплексами работ) применяют методы сетевого моделирования. Методы сетевого планирования и управления на практике используются для решения задач: задача о максимальном потоке; задача о потоке минимальной стоимости; транспортная задача; задача определения критического пути; задача определения кратчайшего пути и др [38,41]. Сетевое моделирование позволяет осуществить координацию звеньев и подразделений, участвующих в сложном комплексе. Деятельность исполнителей рассматривается как единый комплекс взаимосвязанных и взаимозависимых операций, направленных на решение задачи.

В нашей жизни часто встречаются ситуации, которые связаны с перемещением («из пункта А в пункт Б») и разнообразным поведением j -го субъекта или функционированием i -го объекта. К числу таких задач относится задача коммивояжера, связанная с минимизацией пути при посещении ряда объектов.

Для составления математической модели задачи обычно вводят следующие обозначения: i и j – номера пунктов выезда и заезда; t_{ij} – время переезда из пункта i в пункт j (в общем случае t_{ij} не равняется t_{ji} , например, если один пункт находится

Общая постановка данной задачи, включающей объезд пунктов, записывается в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} F &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} \delta_{ij} \rightarrow MIN \\ \sum_{i=1}^n \delta_{ij} &= 1; \quad j = \overline{1, n}; \\ \sum_{j=1}^n \delta_{ij} &= 1; \quad i = \overline{1, n}; \\ \delta_{ij} &= [0;1]; \end{aligned} \right\}$$

К числу таких задач относится задача поиска кратчайшего пути:

Пусть данная задача формулируется следующим образом: из пункта i в пункт j ведёт много дорог, на одних из которых движение одностороннее, а на других -двустороннее (длина пути между пунктами указывается на каждой дуге). Требуется найти кратчайший путь из пункта i в пункт j .

При составлении математической модели задачи должно соблюдаться условие непрерывности маршрута и одноразовости посещения пунктов (в каждый пункт должна входить и выходить только одна дуга). Это требование выполняется, если соблюдаются условия:

а) для дуг, входящих в пункт,

$$N_{i \text{ вх}} = \sum_{k=1}^p \delta_{ki} = 1,$$

где δ_{ki} соответствует дуге, выходящей из пункта k и входящей в пункт i ;

$\delta_{ki} = 1$, если дуга $k-i$ входит в маршрут;

$\delta_{ki} = 0$ - в противном случае;

б) для дуг, выходящих из пункта,

$$N_{i \text{ вых}} = \sum_{j=1}^p \delta_{ij} = 1,$$

где δ_{ij} соответствует дуге, выходящей из пункта i и входящей в пункт j ;

$\delta_{ij} = 1$, если дуга $i - j$ входит в маршрут;

$\delta_{ij}=0$ -в противном случае.

Пункты маршрута подразделяются на начальный, промежуточный и конечный, и для них должно выполняться условие:

$$N_{i \text{ вх}} - N_{i \text{ вых}} = \begin{cases} 1 - \text{для начального пункта;} \\ 0 - \text{для промежуточного пункта;} \\ 1 - \text{для конечного пункта.} \end{cases}$$

Если необходимо, чтобы маршрут имел при этом и кратчайшую длину, необходимо добавить следующую целевую функцию:

$$F = \sum_i \sum_j c_{ij} \delta_{ij},$$

где c_{ij} - длина пути, а суммирование производится по всем дугам.

Объединяя ограничения и целевую функцию, запишем систему:

$$\left. \begin{aligned} F = \sum_i \sum_j c_{ij} \delta_{ij} &\rightarrow \min; \\ \sum_{k=1}^n \delta_{ki} - \sum_{j=1}^l \delta_{ij} &= 1 - \text{для начального пункта;} \\ &0 - \text{для промежуточного пункта;} \\ &1 - \text{для конечного пункта.} \\ \delta_{ij} &\geq 0 \end{aligned} \right\}$$

Пример нахождения кратчайшего маршрута: дана сеть, каждое ребро которой помечено числом, равным его длине. Требуется найти кратчайший маршрут, ведущий от выделенного узла к каждому из узлов сети.

К числу таких задач относится и задача о распределении потоков в сети. Решение этой задачи базируется на наличии сети определённой конфигурации, по которой транспортируется продукция (нефть, газ и др.). Обычно требуется найти оптимальный вариант транспортировки продукции (потока в сети) за определённое время.

Каждая дуга такой сети i - j характеризуется: c_{ij} - стоимостью транспортировки единицы продукции по дуге; D_{ij} - пропускной способностью дуги, в общем случае изменяющейся в пределах $0 \leq D_{ij} < \infty$

В такой сети могут быть узлы трёх видов: выпускающие или потребляющие и транзитные. Характеристиками для таких узлов

являются: а) для выпускающего - A_i (количество продукции, выпускаемой узлом i в единицу времени); б) для потребляющего - B_j (количество продукции, потребляемой узлом j в единицу времени); в) для транзитного узла - $A_i B_j = 0$.

В общем случае в каждый узел могут входить и выходить потоки. Суммарные потоки, соответственно входящие в i -й узел ($S_{вх}$) или выходящие из него ($S_{вых}$), определяются так:

$$S_{вх} = \sum_{k=1}^p X_{ki}; \quad S_{вых} = \sum_{j=1}^l X_{ij}$$

Составим уравнения для выпускающего и потребляющего узлов:

Для выпускающего узла:

$$S_{вх} = A_i + \sum_{k=1}^p x_{ki}; \quad S_{вых} = \sum_{j=1}^l x_{ij}; \quad \sum_{k=1}^p x_{ki} - \sum_{j=1}^l x_{ij} = -A_i;$$

Для потребляющего узла:

$$S_{вх} = \sum_{k=1}^p x_{ki}; \quad S_{вых} = \sum_{j=1}^l x_{ij} + B_i; \quad \sum_{k=1}^p x_{ki} - \sum_{j=1}^l x_{ij} = B_i.$$

Объединяя полученные уравнения для типов узлов, запишем:

$$\sum_{k=1}^p x_{ki} - \sum_{j=1}^l x_{ij} = \begin{cases} A_i - \text{для выпускающего узла} \\ 0 - \text{для транзитного узла} \\ B_i - \text{для потребляющего узла} \end{cases}$$

Уравнения баланса для разных типов узлов:

$$\sum_{j=1}^l x_{ij} = A_i - \text{для начального узла};$$

$$\sum_{k=1}^n x_{kn} = B_n - \text{для конечного узла}$$

$$\sum_{k=1}^p x_{ki} - \sum_{j=1}^l x_{ij} = 0 - \text{для транзитного узла}$$

Если необходимо решить задачу оптимизации потока в сети, то необходимо дополнительно сформулировать целевую функцию и граничные условия. При этом возможны различные постановки задачи оптимизации – по минимизации стоимости и по максимизации потока.

1. Минимизация стоимости:

$$\left. \begin{aligned} F &= \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \\ A_1 &= A_3; \\ 0 &\leq x_{ij} \leq D_{ij} \end{aligned} \right\}$$

2. Максимизация потока:

$$\left. \begin{aligned} F &= \sum_i \sum_j B_n \rightarrow \max \\ A_1 &= A_3; \\ \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} &\leq C_3; \\ 0 &\leq x_{ij} \leq D_{ij} \end{aligned} \right\}$$

где c_{ij} - стоимость транспортировки единицы продукции по дуге;

суммирование проводится по всем дугам;

D_{ij} – пропускная способность дуги.

Первая постановка обеспечивает получение потоков в сети, которые не превышают по каждой дуге её пропускной способности, а также минимальную стоимость транспортировки, вторая постановка – получение максимального потока, стоимость транспортировки которого по всем дугам не превышает заданной стоимости C_3 .

ГЛАВА 2. СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ ОПТИМИЗАЦИЯ

2.1 Основные понятия и правила построения сетевых моделей

В экономических исследованиях сетевые модели возникают при моделировании экономических процессов методами сетевого планирования и управления (СПУ). Система методов СПУ – система методов планирования и управления разработкой крупных народнохозяйственных комплексов, научными исследованиями, конструкторской и технологической подготовкой производства, новых видов изделий, строительством и реконструкцией, капитальным ремонтом основных фондов путем применения сетевых моделей.

СПУ основано на моделировании процесса с помощью сетевого графика и представляет собой совокупность расчетных методов, организационных и контрольных мероприятий по планированию и управлению комплексом работ. Для того чтобы составить план работ по осуществлению больших и сложных проектов, состоящих из тысяч отдельных исследований и операций, необходимо описать его с помощью математической модели - сетевой модели. Сетевая модель — это план выполнения некоторого комплекса взаимосвязанных работ, заданного в форме сети, графическое изображение которой называется сетевым графиком.

СПУ включает три основных этапа [2]: структурное планирование; календарное планирование; оперативное управление.

Структурное планирование начинается с разбиения проекта на четко определенные операции, для которых определяется продолжительность. Затем строится сетевой график, который представляет взаимосвязи работ

проекта. Это позволяет детально анализировать все работы и вносить улучшения в структуру проекта еще до начала его реализации.

Календарное планирование предусматривает построение календарного графика, определяющего моменты начала и окончания каждой работы и другие временные характеристики сетевого графика. Это позволяет, в частности, выявлять критические операции, которым необходимо уделять особое внимание, чтобы закончить проект в директивный срок. Во время календарного планирования определяются временные характеристики всех работ с целью проведения в дальнейшем оптимизации сетевой модели, которая позволит улучшить эффективность использования какого-либо ресурса.

В ходе оперативного управления используются сетевой и календарный графики для составления периодических отчетов о ходе выполнения проекта. При этом сетевая модель может подвергаться оперативной корректировке, вследствие чего будет разрабатываться новый календарный план остальной части проекта.

Комплекс работ (комплекс операций, или проект) - это всякая задача, для выполнения которой необходимо осуществить достаточно большое количество разнообразных работ (таких как строительство некоторого здания), и разработка проекта этого сооружения, и даже процесс построения планов реализации проекта [1].

На предварительном этапе планирования определяются структура комплекса работ, последовательность выполнения отдельных операций, состав и взаимосвязи организаций - соисполнителей, ориентировочные сроки исполнения проекта, потребность в основных ресурсах и финансовых средствах.

Основными понятиями сетевых моделей являются понятия события и работы [2].

Термин «работа» в СПУ имеет несколько значений. Во-первых, это действительная работа — протяжённый во времени процесс, требующий затрат ресурсов (например, сборка изделия, испытание прибора и т.п.). Каждая действительная работа должна быть конкретной, чётко описанной и иметь ответственного исполнителя. Во-вторых, это ожидание — протяжённый во времени процесс, не требующий затрат труда (например, процесс сушки после покраски, старения металла, твердения бетона и т.п.). В-третьих, это зависимость, или фиктивная работа — логическая связь между двумя или несколькими работами (событиями), не требующими затрат труда, материальных ресурсов.

Работа - это некоторый процесс, приводящий к достижению определенного результата, требующий затрат каких-либо ресурсов и имеющий протяженность во времени.

По своей физической природе работы можно рассматривать как:

- действие: разработка чертежа, изготовление детали, заливка фундамента бетоном, изучение конъюнктуры рынка;
- процесс: старение отливок, выдерживание вина, травление плат;
- ожидание: ожидание поставки комплектующих, прослеживание детали в очереди к станку.

По количеству затрачиваемого времени работа, может быть:

- действительной, т.е. требующей затрат времени;
- фиктивной, т.е. формально не требующей затрат времени и представляющей связь между какими-либо работами.

Работа обозначается парой заключенных в скобки чисел (i,j) : первое « i » - номер события, из которого работа выходит, а « j » - номер события, в которое она входит. Работа не может начаться раньше, чем свершится событие, из которого она выходит.

Каждая работа имеет определенную продолжительность $t(I,j)$. Например, запись $t(2,5) = 4$ означает, что работа (2,5) имеет продолжительность 4 единицы времени.

К работам относятся также такие процессы, которые не требуют ни ресурсов, ни времени выполнения. Они заключаются в установлении логической взаимосвязи работ и показывает, что одна из них непосредственно зависит от другой; такие работы называются фиктивными и на графике изображаются пунктирными стрелками.

Событие - это момент времени, когда завершаются одни работы и начинаются другие. Например, фундамент залит бетоном, старение отливок завершено, комплектующие поставлены, отчеты сданы и т.д.. Событие представляет собой результат проведенных работ и, в отличие от работ, не имеет протяженности во времени.

События обозначаются одним числом и на графике изображаются кружком (или иной геометрической фигурой), внутри которого проставляется его порядковый номер ($i = 1, 2, \dots, N$). В сетевой модели имеется начальное событие (с номером 1), из которого работы только выходят, и конечное событие (с номером N), в которое работы только входят.

На этапе структурного планирования взаимосвязь работ и событий, необходимых для достижения конечной цели проекта, изображается с помощью сетевого графика (сетевой модели). На сетевом графике работы изображаются стрелками, которые соединяют вершины, изображающие события. Начало и окончание любой работы описываются парой событий, которые называются начальным и конечным событиями. Поэтому для идентификации конкретной работы используют код работы (i,j) , состоящий из номеров начального (i -го) и конечного (j -го) событий (рис.9).

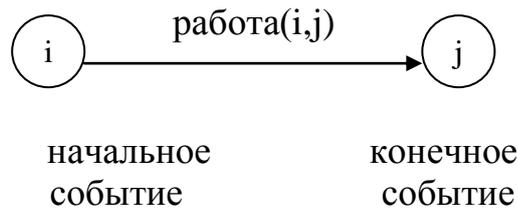


Рисунок 9 - Кодирование работы

Любое событие может считаться наступившим только тогда, когда закончатся все входящие в него работы. Поэтому, работы, выходящие из некоторого события не могут начаться, пока не будут завершены все работы, входящие в это событие.

Событие, не имеющее предшествующих ему событий, т.е. с которого начинается проект, называют исходным. Событие, которое не имеет последующих событий и отражает конечную цель проекта, называется завершающим.

При построении сетевого графика необходимо следовать следующим правилам:

- правило последовательности изображения работ: сетевые модели следует строить от начала к окончанию, т.е. слева направо;
- правило изображения стрелок. В сетевом графике стрелки, обозначающие работы, ожидания или зависимости, могут иметь различный наклон и длину, но должны идти слева направо, не отклоняясь влево от оси ординат, и всегда направляться от предшествующего события к последующему, т.е. от события с меньшим порядковым номером к событию с большим порядковым номером;
- правило пересечения стрелок. При построении сетевого графика следует избегать пересечения стрелок: чем меньше пересечений, тем нагляднее график;

- правило обозначения работ. В сетевом графике между обозначениями двух смежных событий может проходить только одна стрелка. Для правильного изображения работ можно ввести дополнительное событие и зависимость;

- правило расчленения и запараллеливания работ. При построении сетевого графика можно начинать последующую работу, не ожидая полного завершения предшествующей. В этом случае нужно "расчленить" предшествующую работу на две, введя дополнительное событие в том месте предшествующей работы, где может начаться новая;

- правило запрещения замкнутых контуров (циклов, петель). В сетевой модели недопустимо строить замкнутые контуры – пути, соединяющие некоторые события с ними же самими, т.е. недопустимо, чтобы один и тот же путь возвращался в то же событие, из которого он вышел;

- правило запрещения тупиков. В сетевом графике не должно быть тупиков, т.е. событий, из которых не выходит ни одна работа, за исключением завершающего события (в многоцелевых графиках завершающих событий несколько, но это особый случай);

- правило запрещения хвостовых событий. В сетевом графике не должно быть хвостовых событий, т.е. событий, в которые не входит ни одна работа, за исключением начального события;

- правило изображения дифференцированно-зависимых работ. Если одна группа работ зависит от другой группы, но при этом одна или несколько работ имеют дополнительные зависимости или ограничения, при построении сетевого графика вводят дополнительные события;

- правило изображения поставки. В сетевом графике поставки (под поставкой понимается любой результат, который предоставляется

"со стороны", т.е. не является результатом работы непосредственного участника проекта) изображаются двойным кружком либо другим знаком, отличающимся от знака обычного события данного графика. Рядом с кружком поставки дается ссылка на документ (контракт или спецификацию), раскрывающий содержание и условия поставки;

- правило учета непосредственных примыканий (зависимостей). В сетевом графике следует учитывать только непосредственное примыкание (зависимость) между работами;

- технологическое правило построения сетевых графиков. Для построения сетевого графика необходимо в технологической последовательности установить:

- какие работы должны быть завершены до начала данной работы;

- какие работы должны быть начаты после завершения данной работы;

- какие работы необходимо выполнять одновременно с выполнением данной работы.

- правила кодирования событий сетевого графика.

Для кодирования сетевых графиков необходимо пользоваться следующими правилами.

- Все события графика должны иметь свои собственные номера.

- Кодировать события необходимо числами натурального ряда без пропусков.

- Номер последующему событию следует присваивать после присвоения номеров предшествующим событиям.

- Стрелка (работа) должна быть всегда направлена из события с меньшим номером в событие с большим номером [7].

Поскольку работы, входящие в проект, могут быть логически связаны друг с другом, то необходимо всегда перед построением сетевого графика дать ответы на следующие вопросы:

- какие работы необходимо завершить непосредственно перед началом рассматриваемой работы?
- какие работы должны непосредственно следовать после завершения данной работы?
- какие операции могут выполняться одновременно с рассматриваемой работой?

Важным для анализа сетевых моделей является понятие пути.

Путь - это любая последовательность работ в сетевом графике (в частном случае это одна работа), в которой конечное событие одной работы совпадает с начальным событием следующей за ней работы. Путь - это цепочка следующих друг за другом работ, соединяющих начальную и конечную вершины (например, путями являются $L1 = (1,2,3,7,10,11)$, $L2 = (1,2,4,5,11)$ и др.). Продолжительность пути определяется суммой продолжительностей составляющих его работ.

Различают следующие виды путей.

Полный путь- это путь от исходного до завершающего события. Критический путь - максимальный по продолжительности полный путь. Работы и события, лежащие на критическом пути, называют критическими и обозначают $L_{кр}$, а его продолжительность $t_{кр}$. Их несвоевременное выполнение ведет к срыву всего комплекса работ.

Подкритический путь - полный путь, ближайший по длительности к критическому пути.

Построение сети является первым шагом на пути к построению календарного плана.

Если построенный сетевой график удовлетворяет сформулированным правилам, предъявленным к его построению, надо проверить полностью ли упорядочен сетевой график.

Упорядочение сетевого графика заключается в таком расположении событий и работ, при котором для любой работы предшествующее ей событие расположено левее и имеет меньший номер по сравнению с завершающим эту работу событием.

Другими словами, в упорядоченном сетевом графике все работы-стрелки направлены слева направо: от событий с меньшими номерами к событиям с большими номерами.

Если события неправильно пронумерованы, то необходимо использовать алгоритм перенумерации событий:

1. нумерация событий начинается с исходного события, которому присваивается № 1;
2. из исходного события вычеркивают все исходящие из него работы (стрелки), и на оставшейся сети находят событие в которое не входит ни одна работа, ему присваивается №2;
3. затем вычеркивают работы, выходящие из события № 2, и вновь находят событие, в которое не входит ни одна работа, и ему присваивается № 3, и так продолжается до завершающего события, номер которого должен быть равен количеству событий в сетевом графике;
4. если при очередном вычеркивании работ одновременно несколько событий не имеют входящих в них работ, то их нумеруют очередными номерами в произвольном порядке.

2.2 Временные параметры сетевых графиков

Основой СПУ является сетевая модель (график), описывающая объект управления в виде сетевого графика. Сетевая модель (сетевой график) –это экономико-математическая модель, представляющая собой совокупность взаимосвязанных работ и событий, отображающих процесс достижения определенной цели. Она может быть представлена в виде графика или таблицы.

После упорядочения сетевого графика определяют параметры событий и работ, резервы времени и критический путь, проводят анализ и оптимизацию сетевого графика.

Отличительной особенностью сетевой модели является четкое определение всех временных взаимосвязей представленных работ.

В таблице 1. Приведены основные временные параметры сетевых графиков [12].

Таблица 1 – Временные параметры сетевых графиков

Элемент сети, характеризующий параметром	Наименование параметра	Условное обозначение параметра
Событие i	Ранний срок наступления события Поздний срок наступления события Резерв времени события	$Tp(i)$ $Tп(i)$ $R(i)$
Работа (I,j)	Продолжительность работы Ранний срок начала работы Ранний срок окончания работы Поздний срок начала работы Поздний срок окончания работы Полный резерв времени Свободный резерв времени	$t(I,j)$ $Tpн(I,j)$ $Tpo(I,j)$ $Tпн(I,j)$ $Tпо(I,j)$ $Rп(I,j)$ $Rс(I,j)$
Путь L	Продолжительность пути Продолжительность критического пути Резерв времени пути	$t(L)$ $tкр$ $R(L)$

К временным параметрам событий относятся:

- $T_p(i)$ – ранний срок наступления события i . Это время, которое необходимо для выполнения всех работ, предшествующих данному событию i . Оно равно наибольшей из продолжительности путей, предшествующих данному событию.

- $T_n(i)$ – поздний срок наступления события i . Это такое время наступления события i , превышение которого вызовет аналогичную задержку наступления завершающего события сети. Поздний срок наступления любого события i равен разности между продолжительностью критического пути и наибольшей из продолжительностей путей, следующих за событием i .

- $R(i)$ – резерв времени наступления события i . Это такой промежуток времени, на который может быть отсрочено наступление события i без нарушения сроков завершения проекта в целом. Начальные и конечные события критических работ имеют нулевые резервы событий.

Рассчитанные численные значения временных параметров записываются прямо в вершины сетевого графика (рис.10).

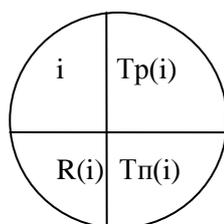


Рисунок 10 – Отображение временных параметров событий в вершинах сетевого графика

Рассмотрим методику расчета временных параметров событий.

Расчет ранних сроков свершения событий ведется от исходного к завершающему событию (рис.11).

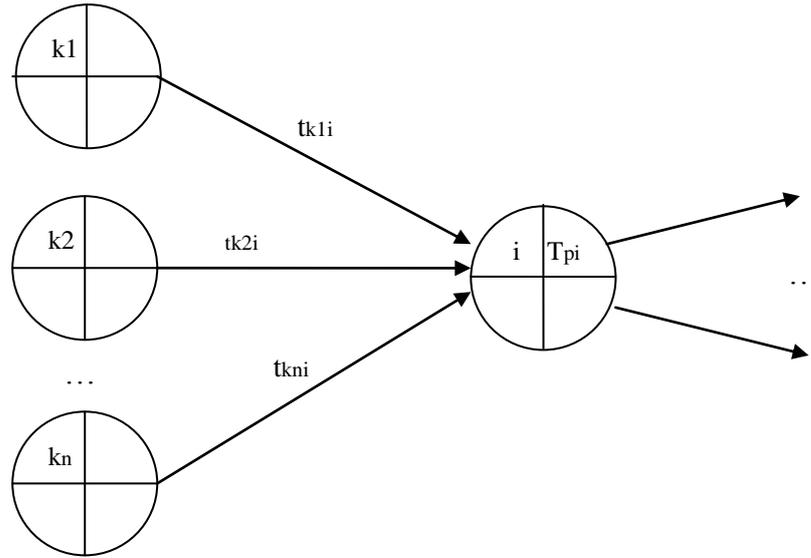


Рисунок 11 – Расчет ранних сроков свершения событий

1) Для исходного события $T_p(i) = T_n(i) = 0$.

2) Для всех остальных событий $T_p(i) = \max_{k < i} [T_p(k) + t(k, i)]$, где максимум

берется по всем работам (k, i) , входящим в событие i .

Поздние сроки свершения событий рассчитываются от завершающего к исходному событию (рис. 12).

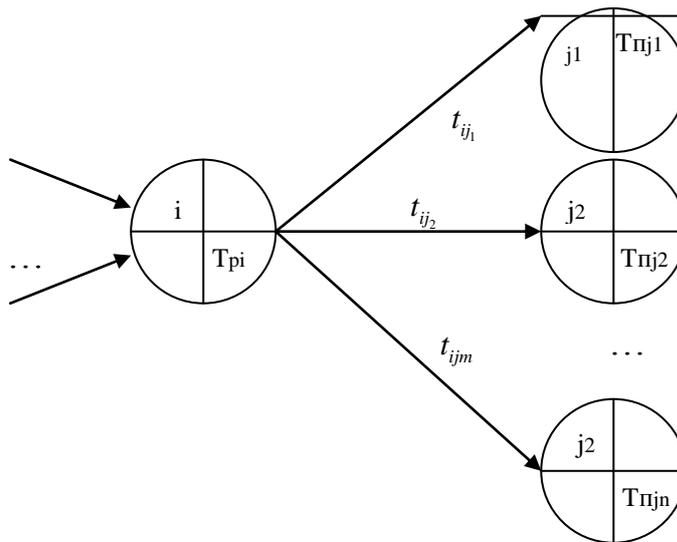


Рисунок 12 – Расчет поздних сроков свершения событий

3) Для завершающего события $T_n(i) = T_p(i)$.

4) $T_n(i) = \min_{k < i} [T_n(j) + t(i, j)]$, где минимум берется по всем работам (i,j), выходящим из события i (рис.12).

5) $R(i) = T_n(i) - T_p(i)$.

На основе ранних и поздних сроков событий определяются временные параметры работ сети.

- $T_{рн}(I,j) = T_p(i)$ (1)

- $T_{пн}(I,j) = T_n(j) - t(I,j)$ или $T_{пн}(I,j) = T_{по}(I,j) - t(I,j)$ (2)

- $T_{ро}(I,j) = T_p(i) + t(I,j)$ или $T_{ро}(I,j) = T_{рн}(I,j) + t(I,j)$ (3)

- $T_{по}(I,j) = T_n(j)$ (4)

Для критических работ $T_{рн}(i,j) = T_{пн}(i,j)$ и $T_{ро}(i,j) = T_{по}(i,j)$.

- $R_n(I,j) = T_n(j) - T_p(i) - t(I,j)$ (5)

- где $R_n(i,j)$ - полный резерв работы; показывает максимальное время, на которое может быть увеличена продолжительность работы (i,j) или отсрочено ее начало, чтобы продолжительность проходящего через нее максимального пути не превысила продолжительности критического пути.

Важнейшее свойство полного резерва работы (i,j) заключается в том, что его частичное или полное использование уменьшает полный резерв у работ, лежащих с работой (i,j) на одном пути. Таким образом полный резерв, принадлежит не одной данной работе (i,j), а всем работам, лежащим на путях, проходящим через эту работу. При использовании полного резерва времени только для одной работы резервы времени остальных работ лежащих на максимальном пути, проходящем через нее, будут полностью исчерпаны. Резервы времени работ, лежащих на других (не максимальных по длительности) путях, проходящих через эту работу, сократятся соответственно на величину использованного резерва.

- $R_c(I,j) = T_p(j) - T_p(i) - t(I,j)$ (6)

- где $Rc(i,j)$ - свободный резерв работы; показывает максимальное время, на которое можно увеличить продолжительность работы (i,j) или отсрочить ее начало, не меняя ранних сроков начала последующих работ.

Использование свободного резерва одной из работ не меняет величины свободных резервов остальных работ сети. Свободным резервом времени можно пользоваться для предотвращения случайностей, которые могут возникнуть в ходе выполнения работы. Если планировать выполнение работ по ранним срокам их начала и окончания, то всегда будет возможность при необходимости перейти на поздние сроки начала и окончания работ.

Резервами времени, кроме работ и событий, обладают полные пути сетевой модели. Разность между продолжительностью критического пути $T(L_{кр})$ и продолжительностью любого другого полного пути $T(L_n)$ называется полным резервом времени пути L_n , т.е. $R(L_n) = T(L_{кр}) - T(L_n)$. Этот резерв показывает, на сколько в сумме может быть увеличена продолжительность всех работ данного пути L_n , чтобы при этом не изменился общий срок окончания всех работ. Работы, лежащие на критическом пути, так же как и критические события, резервов времени не имеют.

Используя полный и свободный резервы времени, организуется, выполнение сетевых работ так, чтобы количество одновременно занятых исполнителей было минимальным, и выравнивается потребность в трудовых ресурсах на протяжении срока выполнения проекта [2].

Для этого строится и анализируется график привязки и график загрузки.

График привязки отображает взаимосвязь выполняемых работ во времени и строится на основе данных либо о продолжительности работ, либо о ранних сроках начала и окончания работ. При первом способе построения необходимо помнить, что работа (i,j) может начать выполняться только после того как будут выполнены все предшествующие ей работы (k,j) . По вертикальной оси графика привязки откладываются коды работ, по горизонтальной оси – длительность работ (раннее начало и раннее окончание работ).

На графике загрузки по горизонтальной оси откладывается время по вертикальной – количество человек, занятых работой в каждый конкретный день. Для построения графика загрузки необходимо: на графике привязки над каждой работой написать количество ее исполнителей; подсчитать количество работающих в каждый день исполнителей и отложить на графике загрузки.

Для удобства построения и анализа графики загрузки и привязки следует располагать один над другим.

Уменьшение каждый день занятых исполнителей происходит за счет сдвига во времени не критических работ, т.е. работ, имеющих полный и/или свободный резервы времени. Полный и свободный резервы любой работы можно определить без специальных расчетов, анализируя только график привязки. Сдвиг работы означает, что она будет выполняться уже в другие дни (т.е. изменится время ее начала и окончания), что в свою очередь приведет к изменению количества исполнителей, работающих одновременно (т.е. уровня ежедневной загрузки сети).

Различие в использовании свободных и полных резервов заключается в том, что при сдвиге работы, с использованием свободного резерва, момент начала следующих за ней работ остаются неизменными

(т.е. последующие работы не сдвигаются). При сдвиге работы, с использованием полного резерва, все последующие работы сдвигаются.

2.3 Анализ и оптимизация сетевого графика

После нахождения критического пути «резервов времени работ» оценки вероятности выполнения проекта в заданный срок должен быть проведён всесторонний анализ сетевого графика и приняты меры по его оптимизации он заключается в приведении сетевого графика в соответствие с заданными сроками и возможностями организации, разрабатывающей проект.

Анализ сетевого графика начинается с анализа топологии сети, включающего контроль построения сетевого графика, установление целесообразности выбора работ, степени их расчленения.

Анализ сетевой модели, представленный в графической или табличной (матричной) форме, позволяет: более четко выразить взаимосвязь этапов реализации проектов и определить наиболее оптимальный порядок выполнения этих этапов в целях, например, сокращения сроков выполнения всего комплекса работ.

Затем проводится классификация и группировка работ по величинам резервов. Величина полного резерва времени далеко не всегда может достаточно точно характеризовать, насколько напряжённым является той или иной работы не критического пути. Всё зависит от того на какую последовательность работ распространяется вычисленный резерв, какова продолжительность этой последовательности. Определить степень трудности выполнения в срок

каждой группы работ, не критического пути можно с помощью коэффициента напряженности работ.

Сеть имеет ряд характеристик, которые позволяют определить степень напряженности отдельных работ, а также всего их комплекса и принять решение о перераспределении ресурсов.

Оптимизации сетевой модели выражается в перераспределении ресурсов с ненапряженных работ на критические для ускорения их выполнения, необходимо как можно более точно оценить степень трудности современного выполнения всех работ, а также «цепочек» пути. Более точным инструментом решения этой задачи по сравнению с полным резервом является коэффициент напряженности.

Коэффициентом напряженности K_n работы (i,j) называется отношение продолжительности несовпадающих (заклученных между одними и теми же событиями) отрезков пути, одним из которых является путь максимальной продолжительности, проходящий через данную работу, а другим критический путь [12], а именно:

$$K_n(i, j) = \frac{t(L_{\max}) - t_{кр}}{t_{кр} - t'_{кр}} = 1 - \frac{R_n(i, j)}{t_{кр} - t'_{кр}}$$

где $t(L_{\max})$ - продолжительность максимального пути, проходящего через работу (i,j) .

$t'_{кр}$ - продолжительность отрезка рассматриваемого пути, совпадающего с критическим путем.

$t_{кр}$ - продолжительность критического пути.

Коэффициент напряженности изменяется от нуля до единицы - $0 \leq K(i, j) \leq 1$. Чем ближе коэффициент напряженности к единице, тем сложнее выполнить данную работу в установленный срок. Самыми

напряженными являются работы критического пути, для которых он равен единице.

На основе этого коэффициента все работы сетевой модели могут быть разделены на три группы:

1. Напряжёнными, если $K(i, j) > 0,8$
2. Подкритические, если $0,6 < K(i, j) < 0,8$
3. Резервные, если $K(i, j) < 0,6$

В результате перераспределения ресурсов стараются максимально уменьшить общую продолжительность работ, что возможно при переводе всех работ в первую группу.

Оптимизация сетевого графика представляет процесс улучшения организации выполнения комплекса работ с учетом срока его выполнения.

Довольно часто случается, что сетевой график (его параметры) не соответствует имеющимся ограничениям либо по времени, либо по ресурсам. Поэтому оптимизация может проводиться по следующим параметрам:

- а) время;
- б) ресурсы: трудовые, материальные, денежные;
- в) время и стоимость.

Приоритет отдается оптимизации по времени, так как от этого зависит оптимизация по другим параметрам.

Оптимизация сетевого графика по времени производится в том случае, если продолжительность работ по графику больше или меньше директивной продолжительности.

Существует несколько методов оптимизации по времени:

- сокращение продолжительности критических работ;
- расчленение критических работ и их запараллеливание;

- изменение топологии сети за счет изменения технологии работ.

Сокращение продолжительности критического пути при использовании метода сокращения продолжительности критических работ достигается за счет перераспределения ресурсов с некритических работ на критические.

Оптимизация проводится с целью сокращения длины критического пути, выравнивания коэффициентов напряженности работ, рационального использования ресурсов.

В первую очередь принимаются меры по сокращению продолжительности работ, находящихся на критическом пути. Это достигается:

- перераспределением всех видов ресурсов, как временных (использование резервов времени некритических путей), так и трудовых, материальных, энергетических (перевод части исполнителей, оборудования с некритических путей на работы критического пути); при этом перераспределение ресурсов должно идти из зон, менее напряженных, в зоны, объединяющие наиболее напряженные работы;
- сокращение трудоемкости критических работ за счет передачи части работ на другие пути, имеющие резервы времени;
- параллельным выполнением работ критического пути;
- пересмотром топологии сети, изменением состава работ и структуры сети.

В процессе сокращения продолжительности работ критический путь может измениться, и в дальнейшем процесс оптимизации будет направлен на сокращение продолжительности работ нового критического пути и так будет продолжаться для получения удовлетворительного результата. В идеале, длина любого из полных путей может стать равной длине критического пути (или пути

критической зоны). Тогда все работы будут вестись с равным напряжением, а срок завершения проекта существенно сократиться.

Эффективным является использование метода статического моделирования, основанного на многократных последовательных изменениях продолжительности работ (в заданных пределах) и “проигрываний” на компьютере различных вариантов сетевого графика с расчетом всех его временных параметров и коэффициентов напряженности работ. Процесс “проигрывания” продолжается до тех пор, пока не будет получен приемлемый вариант плана или пока не будет установлено, что все имеющиеся возможности улучшения плана исчерпаны или поставленные перед разработчиком проекта условия невыполнимы.

Целью оптимизации сетевой модели по критерию «Время-затраты» является сокращение времени выполнения проекта в целом. Эта оптимизация имеет смысл только в том случае, когда время выполнения работ может быть уменьшено за счет задействования дополнительных ресурсов, что приводит к повышению затрат на выполнение работ (рис.13). Для оценки величины дополнительных затрат, связанных с ускорением выполнения той или иной работы, используются либо нормативы, либо данные о выполнении аналогичных работ в прошлом. Под параметрами работ $C_n(i,j)$ и $C_p(i,j)$ понимаются прямые затраты, непосредственно связанные с выполнением конкретной работы. Косвенные затраты типа административно-управленческих в процессе сокращения длительности проекта во внимание не принимаются, но их влияние учитывается при выборке окончательного календарного плана проекта [2].

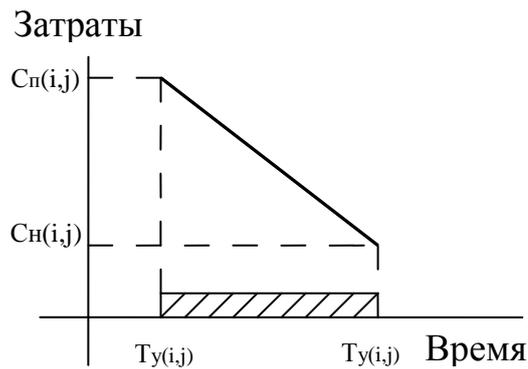


Рисунок 13 - Зависимость прямых затрат на работу от времени ее выполнения

Важными параметрами работы (i,j) при проведении данного вида оптимизации являются:

- коэффициент нарастания затрат

$$k(i, j) = \frac{C_{п}(i, j) - C_{н}(i, j)}{T_{н}(i, j) - T_{y}(i, j)},$$

который показывает затраты денежных средств, необходимые для сокращения длительности работы (i,j) на один день;

- запас времени для сокращения длительности работы в текущий момент времени

$$Z_T(i, j) = t_T(i, j) - T_y(i, j),$$

где $t_T(i, j)$ - длительность работы (i,j) на текущий момент времени, максимально возможное значение запаса времени работы равно:

$$Z_{\max}(i, j) = T_{н}(i, j) - T_y(i, j).$$

Эта ситуация имеет место, когда длительность работы (i,j) еще ни разу не сокращали, т.е. $t_T(i, j) = T_n(i, j)$.

Рассмотрим схему проведения оптимизации «Время-затраты»

1. Исходя из нормальных длительностей работ $T_n(i,j)$, определяются критические $L_{кр}$ и подкритические $L_{п}$ пути сетевой модели и их длительности $T_{кр}$ и $T_{п}$.

2. Определяется сумма прямых затрат на выполнение всего проекта $C_{пр}^0$ при нормальной продолжительности работ.

3. Рассматривается возможность сокращения продолжительности проекта, для чего анализируются параметры критических работ проекта.

3.1. Для сокращения выбирается критическая работа с \min коэффициентом нарастания затрат $k(i,j)$, имеющая ненулевой запас времени сокращения $Z_T(i,j)$.

3.2. Время $\Delta t(i, j)$, на которое необходимо сжать длительность работы (i,j) , определяется как

$$\Delta t(i, j) = \min[Z_T(i, j), \Delta T],$$

где $\Delta T = T_{кр} - T_{п}$ – разность между длительностью критического и подкритического путей в сетевой модели.

Необходимость учета параметра ΔT вызвана нецелесообразностью сокращения критического пути более, чем на ΔT единиц времени. В этом случае критический путь перестанет быть таковым, а подкритический путь наоборот станет критическим, т.е. длительность проекта в целом принципиально не может быть сокращена больше, чем на ΔT .

4. В результате сжатия критической работы временные параметры сетевой модели изменяются, что может привести к появлению других

критических и подкритических путей. Вследствие подорожания ускоренной работы общая стоимость проекта увеличивается на величину

$$\Delta C_{\text{пр}} = k(i,j) \Delta t(i,j)$$

5. Для измененной сетевой модели определяются новые критические и подкритические пути и их длительности, после чего необходимо продолжить оптимизацию с шага 3.

При наличии ограничения в денежных средствах, их исчерпание является причиной окончания оптимизации. Если не учитывать подобное ограничение, то оптимизацию можно продолжать до тех пор пока у работ, которые могли бы быть выбраны для сокращения, не будет исчерпан запас времени сокращения.

Рассмотренная общая схема оптимизации предполагает наличие одного критического пути в сетевой модели. В случае существования нескольких критических путей необходимо либо сокращать общую для них всех работу, либо одновременно сокращать несколько различных работ, принадлежащих различным критическим путям. Возможна комбинация этих двух вариантов. В каждом случае критерием выбора работы или работ для сокращения должен служить минимум затрат на их общее сокращение.

2.4 Сетевое планирование в условиях неопределенности

Продолжительность работ (выполнения) часто трудно задать точно и потому в практической работе вместо одного числа (детерминированная оценка) задаются две оценки – минимальная и максимальная.

Минимальная (оптимистическая) оценка $t_{\min}(i,j)$ характеризует продолжительность выполнения работы при наиболее благоприятных обстоятельствах, а максимальная (пессимистическая) $t_{\max}(i,j)$ – при наиболее неблагоприятных.

Продолжительность работы в этом случае рассматривается как случайная в заданном интервале. Такие оценки называются вероятностными (случайными), и их ожидаемое значение $t_{ож}$ оценивается по формуле (при бета-распределении плотности вероятности):

$$t_{ож}(I,j) = (3t_{\min}(I,j) + 2t_{\max}(I,j)) : 5$$

Для характеристики степени разброса возможных значений вокруг ожидаемого уровня используется показатель дисперсии S^2 :

$$S^2(I,j) = (t_{\max}(I,j) - t_{\min}(I,j))^2 : 5^2 = 0,04 (t_{\max}(I,j) - t_{\min}(I,j))^2$$

На основе этих оценок можно рассчитать все характеристики сетевой модели, однако они будут иметь иную природу, будут выступать как средние характеристики. При достаточно большом количестве работ можно утверждать (а при малом – лишь предполагать), что общая продолжительность любого, в том числе и критического, пути имеет нормальный закон распределения со средним значением, равным сумме средних значений продолжительности составляющих его работ и дисперсией, равной сумме дисперсий этих же работ.

Кроме обычных характеристик сетевой модели, при вероятностном задании продолжительности работ можно решить две дополнительные задачи [16]:

1. Определить вероятность того, что продолжительность критического пути $t_{кр}$ не превысит заданного директивного уровня T ;
2. Определить максимальный срок выполнения всего комплекса работ T при заданном уровне вероятности p .

Первая задача решается на основе интеграла вероятностей Лапласа $\Phi(z)$ использованием формулы [24]:

$$P(t_{кр} < T) = 0,5 + 0,5\Phi(z),$$

где z – нормированное отклонение случайной величины:

$$z = (T - t_{кр}) / S_{кр};$$

где $S_{кр}$ – среднее квадратическое отклонение, вычисляемое как корень квадратный из дисперсии продолжительности критического пути.

При достаточно большой полученной величине вероятности (более 0,8) можно с высокой степенью уверенности предполагать своевременность выполнения всего комплекса работ.

Для решения второй задачи используется формула:

$$T = t_{ож}(L_{кр}) + Z \times S_{кр}$$

Кроме описанного упрощенного способа расчета сетей с детерминированной структурой и вероятностными оценками продолжительности выполнения работ, используется метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) [10]. В соответствии с ним на ЭВМ многократно моделируются продолжительности выполнения всех работ и рассчитываются основные характеристики сетевой модели. Большой объем испытаний позволяет более точно выявить закономерности моделируемой сети.

ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

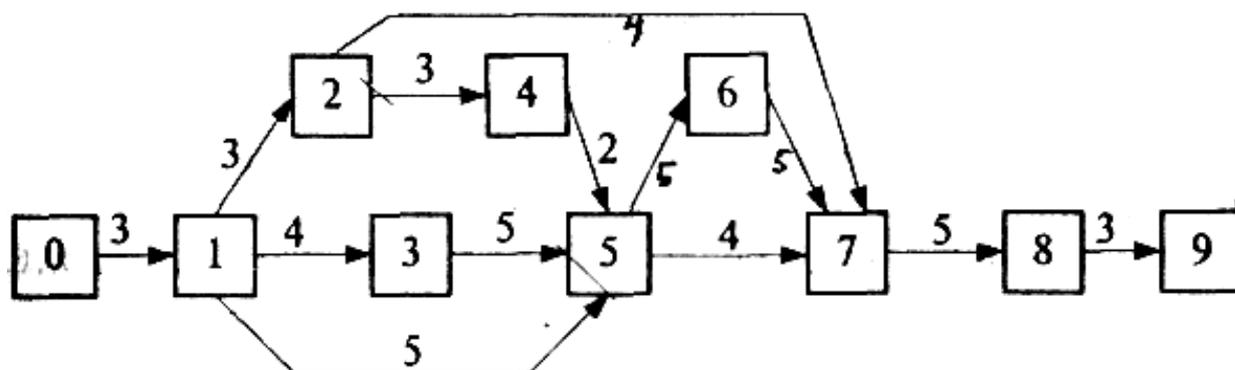
3.1. Применение сетевых моделей для создания опытного образца

Построить сетевой график создания опытного образца радиоприемника по перечню работ, приведенного в таблице 2. Определить временные параметры событий и критический путь для сетевого графика.

Таблица 2

№ п/п	Код работы	Работа	Продолжительность выполнения работы, недели
1	2	3	4
1	0-1	Разработка технического задания	3
2	1-5	Проведение патентного поиска	5
3	1-2	Разработка блок-схемы	3
4	1-3	Разработка эскизного проекта	4
5	2-4	Разработка принципиальной схемы	3
6	4-5	Проведение расчетов	2
7	3-5	Макетирование блоков	5
8	5-7	Разработка конструкторской документации	4
9	5-6	Разработка технологической документации и оснастки	5
10	6-7	Изготовление оснастки	5
11	2-7	Выбор и приобретение комплектующих	4
12	7-8	Изготовление опытного образца	5
13	8-9	Испытание опытного образца и корректировка документации	3

Сетевой график представим на рисунке.



Для определения раннего срока совершения событий используются формулы:

$$t_p(i) = \max t_{pik}(i), t_p(1) = 0, t_p(N) = t_{кр}(L)$$

$$t_p(j) = \max (t_p(i_m) + t(i_{m,j})), R(i) = t_n(i) - t_p(i)$$

Результаты расчетов сведем в таблицу:

№ п/п	Сроки свершения событий (недели)		R(i) (недели)
	Ранний, $t_p(i)$	Поздний, $t_n(i)$	
0	$t_p(0) = 0$	$t_n(0) = 3-3 = 0$	0
1	$t_p(1) = 3,$ $t_p(1) = t_p(0) + t(0,1) = 0+3 = 3$	$t_n(1) = \min(7-3;12-5;7-4) = 3$	0
2	$t_p(2) = t_p(1) + t(1,2) = 3+3 = 6$	$t_n(2) = \min(t_n(4) - t(2,4);$ $t_n(7) - t(2,7)) = \min(10 - 3;22 - 4) = 7$	1
3	$t_p(3) = t_p(1) + t(1,3) = 3 + 4 = 7$	$t_n(3) = t_n(5) - t(3,5) = 12-5 = 7$	0
4	$t_p(4) = t_p(2) + t(2,4) = 6+3 = 9$	$t_n(4) = t_n(5) - t(4,5) = 12-2 = 10$	1
5	$t_p(5) = \max(7+5;3+5;9+2) = 12$	$t_n(5) = \min(t_n(7)-t(5,7);$ $t_n(6) - (5,6)) = \min(22 - 4;17 - 5) = 12$	0
6	$t_p(6) = t_p(5) + t(5,6) = 12+5 = 17$	$t_n(6) = t_n(7) - t(6,7) = 22-5 = 17$	0
7	$t_p(7) = \max(6+4;17+5;12+4) = 22$	$t_n(7) = t_n(8) - t(7,8) = 27-5 = 22$	0
8	$t_p(8) = t_p(7) + t_p(7,8) = 22+5 = 27$	$t_n(8) = t_n(9) - t(8,9) = 30-3 = 27$	0
9	$t_p(9) = t_p(8) + t(8,9) = 27+3 = 30$	$t_n(9) = 30$	0

$$i = 0, t_p(0) = 0$$

$i = 1, t_p(1) = t_p(0) + t(0,1) = 0 + 3 = 3$; для события 1 существует только один предшествующий путь $0 \rightarrow 1$

$$i = 2, t_p(2) = t_p(1) + t(1,2) = 3 + 3 = 6; \text{ для события 2: } 0 \rightarrow 1 \rightarrow 2$$

$$i = 3, t_p(3) = t_p(1) + t(1,3) = 3 + 4 = 7; \text{ для события 3: } 0 \rightarrow 1 \rightarrow 3$$

$$i = 4, t_p(4) = t_p(2) + t(2,4) = 6 + 3 = 9; \text{ для события 4: } 0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4$$

$i = 5, t_p(5) = \max (t_p(4) + t(4,5); t_p(3) + t(3,5); t_p(1) + t(1,5) = \max (9+2; 7+5; 3+5) = 12$; для события 5 существует три предшествующих пути: $0 \rightarrow 1 \rightarrow 5$; $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 5$; $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ и три предшествующих события: 1; 3; 4.

$$i = 6, t_p(6) = t_p(5) + t(5,6) = 12 + 5 = 17$$

$$i = 7, \quad t_p(7) = \max(t_p(2) + t(2,7); t_p(6) + t(6,7); t_p(5) + t(5,7)) = \max(6+4; 17+5; 12+4) = 22$$

$$i = 8, \quad t_p(8) = t_p(7) + t(7,8) = 22 + 5 = 27$$

$$i = 9, \quad t_p(9) = t_p(8) + t(8,9) = 27 + 3 = 30.$$

Длина критического пути равна раннему сроку совершения завершающего события 9:

$$t_p = t_p(9) = 30 \text{ (неделя)}.$$

При определении поздних сроков совершения событий $t_n(i)$ двигаемся по сети в обратном направлении, т.е. справа налево и используем формулы:

$$t_n(i) = t_{кр} - \max t_r(i, N) \text{ и } t_n(i) = \min(t_n(j_e) - t(i, j_e)).$$

Для $i = 9$ (завершающего события) поздний срок свершения события должен равняться его раннему сроку (иначе изменится длина критического пути):

$$t_p(9) = t_n(9) = 30 \text{ (неделя)}.$$

Для $i = 8$, $t_n(8) = t_p(9) - t(8,9) = 30 - 3 = 27$, т.к. для события 8 существует только один последующий путь $8 \rightarrow 9$.

Для $i = 7$, $t_n(7) = t_n(8) - t(7,8) = 27 - 5 = 22$, т.к. для события 7: $7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$.

Для $i = 6$, $t_n(6) = t_n(7) - t(6,7) = 22 - 5 = 17$; т.к. для события 6: $6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$.

Для $i = 5$, $t_n(5) = \min(t_n(7) - t(5,7); t_n(6) - t(5,6)) = \min(22-4; 17-5) = 12$, т.к. для события 5 существует два последующих пути: $5 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ и $5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ и два последующих события: 6 и 7.

$$\text{Для } i = 4, \quad t_n(4) = t_n(5) - t(4,5) = 12 - 2 = 10.$$

$$\text{Для } i = 3, \quad t_n(3) = t_n(5) - t(3,5) = 12 - 5 = 7.$$

$$\text{Для } i = 2, \quad t_n(2) = (\min(t_n(4) - t(2,4); t_n(7) - t(2,7))) = \min(10-3; 22-4) = 7.$$

$$\text{Для } i = 1, \quad t_n(1) = \min(t_n(2) - t(1,2); t_n(5) - t(1,5); t_n(3) - t(1,3)) = \min(7-3; 12-5; 7-4) = 3.$$

$$\text{Для } i = 0, \quad t_n(0) = t_n(1) - t(0,1) = 3 - 3 = 0.$$

По формуле $R(i) = t_n(i) - t_p(i)$ определяем резервы времени i -го события.

Резерв времени, например, события 2 – $R(2)=1$, означает, что время свершения события 2 может быть задержено на 1 неделю без увеличения общего срока выполнения проекта.

Так как критический путь проходит через события с нулевыми резервами времени: 0, 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9 (критический путь выделить жирной линией). Длина критического пути $t_{кр} = 30$ недель.

Вычислим временные параметры работ для полученного сетевого графика (табл.3)

Вычисление временных параметров работы (напр-р – (1,3)):

1. $t_{рн} = (1,j) = t_p(i)$ – ранний срок начала работы $t_{рн}(1,9) = t_p(1) = 3$.

2. $t_{ро}(i,j) = t_p(i) + t(i,j)$ – ранний срок окончания работы
 $t_{ро}(1,3) = t_p(1) + t(1,3) = 3 + 4 = 7$.

3. $t_{пн} = (i,j) = t_n(j) - t(i,j)$ – поздний срок начала работы
 $t_{пн}(1,3) = t_n(4) - t(1,3) = 10 - 4 = 6$.

4. $t_{по}(i,j) = t_n(j)$ – поздний срок окончания работы
 $t_{по}(1,3) = t_n(3) = 7$.

Таким образом, работа (1,3) должна начаться в интервале [3;6] (неделя) и окончиться в интервале [7;7] (неделя) от начала выполнения проекта.

5. $R_n(i,j) = t_n(j) - t_p(i) - t(i,j)$ – полный резерв работы

$R_n(1,3) = t_n(3) - t_p(1) - t(1,3) = 7 - 3 - 4 = 0$ (неделя), т.е. срок выполнения данной работы можно увеличить на 0 недель, при этом срок выполнения комплекса работ не изменится.

№ п/п	Работа (i,j)	Пр-ть работ t (i,j)	Сроки начала и окончания работы				Таблица 3 Резервы времени работы	
			$t_{pn}(i,j) = t_p(i)$	$t_{po}(i,j) = t_p(i) + t(i,j)$	$t_{nn}(i,j) = t_n(j) - t(i,j)$	$t_{no}(i,j) = t_n(j)$	$R_n = t_n(j) - t_p(i) - t(i,j)$	$R_n = R_n(i,j) - R(i) - R(j)$
1	2	3	4	$5 = 4 + 3$	$6 = 7 - 3$	7	$8 = 7 - 4 - 3$	$9 = 8 - R(i) - R(j)$
1	(0,1)	3	$t_p(0) = 0$	$t_p(0) + t(0,1) = 0 + 3 = 3$	$t_n(1) - t(0,1) = 3 - 3 = 0$	$t_n(1) = 3$	$t_n(1) - t_p(0) - t(1,0) = 3 - 0 - 3 = 0$	$0 - 0 - 0 = 0$
2	(1,5)	5	$t_p(1) = 3$	$t_p(1) + t(1,5) = 3 + 5 = 8$	$t_n(5) - t(1,5) = 12 - 5 = 7$	$t_n(5) = 12$	$t_n(5) - t_p(1) - t(1,5) = 12 - 3 - 5 = 4$	$4 - 0 - 0 = 4$
3	(1,2)	3	$t_p(1) = 3$	6	$t_n(2) - t(1,2) = 7 - 3 = 4$	$t_n(2) = 7$	$t_n(2) - t_p(1) - t(1,2) = 7 - 3 - 3 = 1$	$1 - 0 - 1 = 0$
4	(1,3)	4	$t_p(1) = 3$	7	$t_n(3) - t(1,3) = 7 - 4 = 3$	$t_n(3) = 7$	$t_n(3) - t_p(1) - t(1,3) = 7 - 3 - 4 = 0$	$0 - 0 - 0 = 0$
5	(2,4)	3	$t_p(2) = 6$	9	$t_n(4) - t(2,4) = 10 - 3 = 7$	$t_n(4) = 10$	$t_n(4) - t_p(2) - t(2,4) = 10 - 6 - 3 = 1$	$1 - 1 - 1 = -1$
6	(4,5)	2	$t_p(4) = 9$	11	$t_n(5) - t(4,5) = 12 - 2 = 10$	$t_n(5) = 12$	$t_n(5) - t_p(4) - t(4,5) = 12 - 9 - 1 = 1$	$1 - 1 - 0 = 0$
7	(3,5)	5	$t_p(3) = 7$	12	$t_n(5) - t(3,5) = 12 - 5 = 7$	$t_n(5) = 12$	$t_n(5) - t_p(3) - t(3,5) = 12 - 7 - 5 = 0$	$0 - 0 - 0 = 0$
8	(5,7)	4	$t_p(5) = 12$	16	$t_n(7) - t(5,7) = 22 - 4 = 18$	$t_n(7) = 22$	$t_n(7) - t_p(5) - t(5,7) = 22 - 12 - 4 = 6$	$6 - 0 - 0 = 6$
9	(5,6)	5	$t_p(5) = 12$	17	$t_n(6) - t(5,6) = 17 - 5 = 12$	$t_n(6) = 17$	$t_n(6) - t_p(5) - t(5,6) = 17 - 12 - 5 = 0$	$0 - 0 - 0 = 0$
10	(6,7)	5	$t_p(6) = 17$	22	$t_n(7) - t(6,7) = 22 - 5 = 17$	$t_n(7) = 22$	$t_n(7) - t_p(6) - t(6,7) = 22 - 17 - 5 = 0$	$0 - 0 - 0 = 0$
11	(2,7)	4	$t_p(2) = 6$	10	$t_n(7) - t(2,7) = 22 - 5 = 17$	$t_n(7) = 22$	$22 - 6 - 4 = 12$	$12 - 1 - 0 = 11$
12	(7,8)	5	$t_p(7) = 22$	27	$t_n(8) - t(7,8) = 27 - 5 = 22$	$t_n(8) = 27$	$27 - 22 - 5 = 0$	$0 - 0 - 0 = 0$
13	(8,9)	3	$t_p(8) = 27$	30	$t_n(9) - t(8,9) = 30 - 3 = 27$	$t_n(9) = 30$	$30 - 27 - 3 = 0$	$0 - 0 - 0 = 0$

Полный резерв времени работы равен продолжительности максимального из путей, проходящих через данную работу.

Например, через работу (4,5) проходят два полных пути:

	Путь	Продолжительность недели
L ₁	0→1→2→4→5→6→7→8→9	3 + 3 + 3 + 2 + 5 + 5 + 5 + 3 = 29
L ₂	0→1→2→4→5→7→8→9	3 + 3 + 3 + 2 + 4 + 5 + 3 = 23

Максимальный из путей, проходящих через работу (4,5) – L₁ продолжительностью 29 (недель), резерв времени которого $R(L_1) = t_{кр} - t(L_1) = 30 - 29 = 1 = R_n(4,5)$. Если увеличить продолжительность выполнения работы (4,5) на 1 неделю, т.е. с 2 по 3 недель, то полностью будет исчерпан резерв времени пути L, т.е. этот путь станет также критическим, а резервы времени других путей уменьшаться соответственно на 1 неделю.

6. $R_n(i,j) = t_p(j) - t_n(i) - t(i,j)$ или $R_n(i,j) = R_n(i,j) - R(i) - R(j)$ независимый резерв времени R_n.

$$R_n(1,3) = t_p(3) - t_n(1) - t(1,3) = 7 - 3 - 4 = 0$$

$$R_n(1,3) = R_n(1,3) - R(1) - R(3) = 0 - 0 - 0 = 0.$$

Определим коэффициенты напряженности для всех работ по формуле:

$$K(i,j) = t(L_{max}) - t_{кр, рассм.} / t_{кр} - t_{кр, рассм.}$$

$$K(0;1) = 30 - 27/30 - 27 = 1$$

$$K(1,5) = 26-21/30-21 = 5/9 = 0,56$$

$$K(1,2) = 29 - 21/30 - 21 = 8/9 = 0,89$$

$$K(1,3) = 30 - 26/30 - 26 = 1$$

$$K(2,4) = 29-21/30-21 = 0,89$$

$$K(4,5) = 29 - 21/30 - 21 = 8/9 = 0,89$$

$$K(3,5) = 30 - 25/30 - 25 = 1$$

$$K(5,7) = 24 - 20/30 - 20 = 0,4$$

$$K(5,6) = 30 - 25/30 - 25 = 1$$

$$K(6,7) = 30 - 25/30 - 25 = 1$$

$$K(2,7) = 29 - 21/30 - 21 = 0,89$$

$$K(7,8) = 30 - 25/30 - 25 = 1$$

$$K(8,9) = 1$$

В соответствии с результатами вычислений $K_n(i,j)$, можно утверждать, что оптимизация сетевой модели возможна за счет резервных работ: (1,5), (5,7).

3.2 Применение сетевых моделей в условиях неопределенности

Пусть структура сетевой модели и оценки продолжительности работ (в сутках) заданы в таблице 4. Требуется: а) получить все характеристики сетевой модели; б) оценить вероятность выполнения всего комплекса работ за 35 дней, 30 дней; в) оценить максимально возможный срок выполнения всего комплекса работ с надежностью 95% (т.е. $p = 0,95$).

Три первые графы таблицы 4 содержат исходные статистические данные, а две последние графы – результаты расчетов по формулам для вычисления ожидаемой продолжительности и дисперсии [32]:

$$t_{ож}(1,2) = (3 \cdot 5 + 2 \cdot 7,5) : 5 = 6; \quad t_{ож}(2,3) = (3 \cdot 4 + 2 \cdot 6,5) : 5 = 5 \text{ и т.д.}$$

$$S^2(1,2) = (7,5 - 5)^2 : 25 = 0,25; \quad S^2(2,3) = (6,5 - 4)^2 : 25 = 0,25 \text{ и т.д.}$$

Таблица 4 - Вероятностные оценки продолжительности работ

Работа (i,j)	Продолжительность		Ожидаемая продолжительность $t_{ож}(i,j)$	Дисперсия $S^2(i,j)$
	$t_{min}(i,j)$	$t_{max}(i,j)$		
(1,2)	5	7,5	6	0,25
(2,3)	4	6,5	5	0,25
(2,4)	3	6	3	1,00
(2,5)	1	5,5	4	0,25
(3,7)	0,5	3,5	1	0,36
(4,5)	5	7,5	6	0,25
(4,6)	3	5,5	4	0,25
(4,9)	5	10	7	1,00
(5,8)	2	4,5	3	0,25
(5,10)	7	12	9	1,00
(6,9)	0	0	0	0,00
(6,11)	3	8	5	1,00
(7,10)	4	9	6	1,00
(8,10)	2	7	4	1,00
(9,10)	1	6	3	1,00
(10,11)	8	10,5	9	0,25
			33	

Таким образом, не только структура сетевой модели, но и числовые значения продолжительности ожидаемого выполнения работ совпали с оценками рассматриваемого выше примера. Критическим является путь:

$L_{кр} = (1,2,4,5,10,11)$, а его продолжительность равна $t_{кр} = t_{ож} = 33$ дня.

Дисперсия критического пути составляет:

$$S^2_{кр} = S^2(1,2) + S^2(2,4) + S^2(4,5) + S^2(5,10) + S^2(10,11) = 0,25 + 1,00 + 0,25 + 1,00 + 0,25 = 2,75.$$

Отсюда $S_{кр} = \sqrt{S^2_{кр}} = 1,66$ – среднее квадратическое отклонение. Тогда имеем:

$$P(t_{кр} < 35) = 0,5 + 0,5\Phi\{(35-33)/1,66\} = 0,5 + 0,5\Phi(1,2) = 0,5 + 0,5 \cdot 0,77 = 0,885.$$

$$P(t_{кр} < 30) = 0,5 + 0,5\Phi\{(30-33)/1,66\} = 0,5 + (-0,5)\Phi(1,8) = 0,5 - 0,5 \cdot 0,95 = 0,035.$$

Таким образом вероятность того, что весь комплекс работ будет выполнен не более чем за 35 дней, составляет 88,5%, в то время как вероятность его выполнения за 30 дней – всего 3,5%.

Для решения второй (по существу обратной) задачи прежде всего в таблице стандартного нормального распределения найдем значение аргумента z , которое соответствует заданной вероятности 95%. В графе $\Phi(z)$ наиболее близкое значение ($0,9545 \cdot 100\%$) к ней соответствует $z = 1,9$. В этой связи, получим: $T = t_{ож}(L_{кр}) + z \cdot S_{кр} = 33 + 1,9 \cdot 1,66 = 36,2$ дня.

Следовательно, максимальный срок выполнения всего комплекса работ при заданном уровне вероятности $p = 95\%$ составляет 36,2 дня.

3.3. Применение сетевых моделей для выполнения проекта проведения строительно-монтажных работ

В таблице 5 приведено содержание работ, выполняемых при строительстве магазина. В ходе исследования была разработана сетевая модель, определены ее временные параметры и проведена ее оптимизация по критерию «Время-затраты» [41].

Таблица 5 – Исходные статистические данные

№	Содержание работы	Коды работ(i,j)	Продолжительность работы
1	Кладка стен из кирпича 2-х этажного здания с цокольным этажом и монтаж плит перекрытия	(1,2)	160
2	Устройство перегородок из кирпича	(2,3)	70
3	Монтаж лестничных маршей и площадок	(2,4)	5
4	Строительство чердака	(2,5)	30
5	Установка оконных и дверных блоков	(3,6)	15
6	Установка лестничных ограждений	(4,8)	10
7	Установка стального профнастила кровли	(5,14)	20
8	Остекление окон	(6,7)	12
9	Установка дверей	(6,8)	15
10	Установка подоконной доски	(7,8)	6
11	Штукатурные работы	(8,9)	25
12	Сантехнические работы	(8,10)	35
13	Электромонтажные работы	(9,12)	30
14	Устройство полов(мозаичных, из керамических плиток, покрытие линолеумом)	(10,11)	55
15	Молярные работы	(11,14)	17
16	Облицовочные работы	(12,13)	30
17	Обойные работы	(13,14)	15
18	Разные работы	(14,15)	10

В приложении 1 представлена сетевая модель, соответствующая исходным данным работы. Каждому событию присвоен номер, что позволяет в дальнейшем использовать не названия работ, а их коды

(табл.4). Численные значения временных параметров событий сети вписаны в соответствующие секторы вершин сетевого графика, а временные параметры работ сети рассчитаны по формулам (1) - (6) и представлены в табл.6.

Таблица 6 - Временные параметры работ сети

(i,j)	t(i,j)	Т _{рн} (i,j)	Т _{ро} (i,j)	Т _{пн} (i,j)	Т _{по} (i,j)	Р _п (i,j)	Р _с (i,j)
(1,2)	160	0	160	0	160	0	0
(2,3)	70	160	230	160	230	0	0
(2,4)	5	160	165	248	253	88	0
(2,5)	30	160	190	320	350	160	0
(3,6)	15	230	245	230	245	0	0
(4,8)	10	165	175	253	263	88	88
(5,14)	20	190	210	350	370	160	160
(6,7)	12	245	257	245	257	0	0
(6,8)	15	245	260	248	263	3	3
(7,8)	6	257	263	257	263	0	0
(8,9)	25	263	288	270	295	17	0
(8,10)	35	263	298	263	298	0	0
(9,12)	30	288	318	295	325	7	0
(10,11)	55	298	353	298	353	0	0
(11,14)	17	353	370	353	370	0	0
(12,13)	30	318	348	325	355	7	0
(13,14)	15	348	363	355	370	7	7
(14,15)	10	370	380	370	380	0	0

Используя полный и свободный резервы времени, организуем, выполнение сетевых работ так, чтобы количество одновременно занятых исполнителей было минимальным, и выровняем потребность в трудовых ресурсах на протяжении срока выполнения проекта. При ограничении на трудовые ресурсы $N = 28$ человек, т.е. максимально возможное значение одновременно занятых исполнителей равно 28 (табл. 7).

Полный резерв времени имеют работы:

$$R_p(2,4) = 88 \quad R_p(2,5) = 160 \quad R_p(4,8) = 88 \quad R_p(5,14) = 160$$

$$R_p(6,8) = 3 \quad R_p(8,9) = 17 \quad R_p(9,12) = 7 \quad R_p(12,13) = 7 \quad R_p(13,14) = 7$$

Свободный резерв времени:

$$R_c(4,8) = 88 \quad R_c(5,14) = 160 \quad R_c(6,8) = 3 \quad R_c(13,14) = 7.$$

Таблица 7

Коды работ	Продолжительность работ	Количество исполнителей
(1,2)	160	8
(2,3)	70	4
(2,4)	5	5
(2,5)	30	11
(3,6)	15	3
(4,8)	10	2
(5,14)	20	5
(6,7)	12	4
(6,8)	15	4
(7,8)	6	2
(8,9)	25	10
(8,10)	35	10
(9,12)	30	12
(10,11)	55	8
(11,14)	17	5
(12,13)	30	4
(13,14)	15	5
(14,15)	10	4

Проанализируем возможность уменьшения загрузки в 20 человек с 160-165 день. Для этого сдвинем работу (2,4) на 70 дней, теперь она будет начинаться не в 160, а в 230 день. Тем самым мы уменьшили загрузку в 20 человек с 160-165 день и в 17 человек с 165-170 день до 15 человек. Так как мы использовали полный резерв работы (2,4), то следующая за ней работа (4,8) так же сдвинется на 70 дней и теперь будет начинаться в 235 день.

Сдвинем работу (13,14) на 7 дней используя полный резерв времени, теперь она будет начинаться не в 348, а в 363 день, тем самым мы уменьшили загрузку в 21 человек с 348-363 день до 16 человек. Таким образом выровнялся ресурс рабочей силы на протяжении всего срока выполнения проекта и количество одновременно занятых исполнителей не превысило установленной нормы $N = 28$ человек.

Вычислим коэффициент напряженности работ сети по формуле (7), чтобы узнать к какому из трех классов относятся работы. Коэффициент напряженности работ находящихся на критическом пути равен единице.

$$K_n(2,4) = 1 - \frac{88}{380-117} = 1 - \frac{88}{263} = 0,66 - \text{подкритическая работа}$$

$$K_n(2,5) = 1 - \frac{160}{380-10} = 1 - \frac{100}{370} = 0,72 - \text{резервная работа}$$

$$K_n(6,8) = 1 - \frac{3}{380-117} = 1 - \frac{3}{263} = 0,98 - \text{напряженная работа}$$

$$K_n(4,8) = 1 - \frac{88}{380-117} = 1 - \frac{88}{263} = 0,66 - \text{подкритическая работа}$$

$$K_n(5,14) = 1 - \frac{160}{380-10} = 1 - \frac{160}{370} = 0,56 - \text{резервная работа}$$

$$K_n(8,9)_n = 1 - \frac{7}{380-10} = 1 - \frac{7}{370} = 0,98 - \text{напряженная работа}$$

$$K_n(9,12)_n = 1 - \frac{7}{380-10} = 1 - \frac{7}{370} = 0,98 - \text{напряженная работа}$$

$$K_n(12,13)_n = 1 - \frac{7}{380-10} = 1 - \frac{7}{370} = 0,98 - \text{напряженная работа}$$

$$K_n(13,14)_n = 1 - \frac{7}{380-10} = 1 - \frac{7}{370} = 0,98 - \text{напряженная работа}$$

Напряженные работы очень сложно выполнить в установленный срок. В результате перераспределения ресурсов стараются максимально уменьшить общую продолжительность работ, что возможно при переводе всех работ в первую группу. Перераспределение ресурсов идет из зон менее напряженных, в зоны, объединяющие наиболее напряженные работы.

Оптимизация по критерию «время - затраты» - сокращение времени выполнения проекта в целом, она имеет смысл, когда длительность выполнения работ может быть уменьшена за счет задействования дополнительных ресурсов, что влечет повышение затрат на выполнение работ.

Исходными данными для проведения оптимизации являются:

- $T_n(i,j)$ - нормальная длительность работы;
- $T_y(i,j)$ - ускоренная длительность;

- $C_n(i,j)$ - затраты на выполнение работы в нормальный срок;
- $C_y(i,j)$ - затраты на выполнение работы в ускоренный срок.

Проведем максимально возможное уменьшение сроков выполнения проекта при минимально возможных дополнительных затратах для исходных данных (табл. 8).

Таблица 8

(i,j)	Нормальный режим		Ускоренный режим	
	$T_n(i,j)$	$C_n(i,j)$	$T_y(i,j)$	$C_p(i,j)$
(1,2)	160	6500000	127	6650000
(2,3)	70	360000	65	380000
(2,4)	5	150000	3	160000
(2,5)	30	900000	24	950000
(3,6)	15	1700000	10	1750000
(4,8)	10	22000	5	24000
(5,14)	20	360000	8	380000
(6,7)	12	98000	7	100000
(6,8)	15	900000	8	950000
(7,8)	6	35000	3	38000
(8,9)	25	550000	20	590000
(8,10)	35	1650000	28	1800000
(9,12)	30	1000000	27	1100000
(10,11)	55	726000	50	741000
(11,14)	17	680000	12	690000
(12,13)	30	690000	20	730000
(13,14)	15	550000	12	580000
(14,15)	10	30000	6	32000
N=28	C0 = 17200000		Cк = 754000	

Исходя из нормальных длительностей работ получаем следующие характеристики исходной сетевой модели.

1. общие затраты на проект $\sum C(i, j) = 16901000$ рублей;
2. длительность проекта $T_{кр}^0 = 380$ дней;
3. критический путь $L_{кр}^0 = (1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)$;
4. подкритический путь $L_{нк}^0 = (1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)$
 $T_{нк}^0 = 377$ дней.

Вычислим коэффициенты нарастания затрат и максимальные запасы времени сокращения работ сетевой модели по формулам (8) и (10) (табл.9).

Таблица 9

(i,j)	Z(i,j)[дни]	k(i,j)[руб/день]
(1,2)	33	4545,45
(2,3)	5	4000
(2,4)	2	5000
(2,5)	6	8333,33
(3,6)	5	10000
(4,8)	5	400
(5,14)	12	1666,67
(6,7)	5	400
(6,8)	7	7142,86
(7,8)	3	1000
(8,9)	5	8000
(8,10)	7	21428,57
(9,12)	3	33333,33
(10,11)	5	3000
(11,14)	5	2000
(12,13)	10	4000
(13,14)	3	10000
(14,15)	4	500

1 шаг:

Для сокращения времени выбираем критическую работу (6,7) с минимальным коэффициентом $k(6,7) = 400$ руб/день. Текущий запас сокращения времени работы (6,7) на данном шаге равен $z_T^0 = z_{\max}(6,7) = 5$ дней. Разность между продолжительностью критического и подкритического путей $\Delta T^0 = T_{кр}^0 - T_{нк}^0 = 380 - 377 = 3$ дня. Поэтому согласно п.3.2. описанной выше общей схеме оптимизации сокращаем работу (6,7) на $\Delta t^1 = \min\{5, 3\} = 3$ дня по формуле (11). Новая текущая длительность работы $t_T^1(6,7) = 12 - 3 = 9$ дней, а запас ее дальнейшего сокращения сокращается до $z_T^1(6,7) = 9 - 9 = 0$.

Измененный сетевой график представлен в приложении 2.

После ускорения работы (6,7) возникли следующие изменения:

- затраты на работу (6,) возросли на 400 руб/день, а за 3 дня равны 1200 рублей, согласно формуле (12) и общие затраты на проект составили $16901000 + 1200 = 16902200$

- длительность проекта $T_{кр}^1 = 377$ дней;

- критический путь:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

- подкритический путь

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15) $T_{нк}^0 = 370$ дней

2 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (6,7) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения критического пути будет сокращение работы(14,15) $k(14,15) = 500$ руб/день $z_T^1 = z_{\max}(14,15) = 4$ дня; $\Delta T^1 = T_{кр}^1 - T_n^1 = 7 - 7 = 0$ дней; $\Delta t^2 = \min\{4,7\} = 4$ дня. Новая текущая длительность работы

$z_T^2(14,15) = 6 - 6 = 0$. дней Измененный сетевой график представлен в приложении 3.

После ускорения работы (14,15) возникли следующие изменения:

- затраты на работу (14,15) 500 руб/день, за 4 дня равен 2000 рублей, и общие затраты на проект составили $16902200 + 2000 = 16904200$;

- длительность проекта $T_{кр}^1 = 373$ дня;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

- подкритические пути :

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 366$ дней.

3 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (14,15) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения обоих критических путей будет ускорение работы (7,8), принадлежащей обоим критическим путям $k(7,8)=1000$ руб/день $z_T^2 = z_{\max}(7,8) = 3$ дня;

$\Delta T^2 = T_{кр}^2 - T_{нк}^2 = 373 - 366 = 7$ дней; $\Delta t^3 = \min\{3, 7\} = 3$ дня. Новая текущая длительность работы $t_T^3(7,8) = 6 - 3 = 3$ дня, $t_T^2(6,8) = 15 - 3 = 12$ дней; $z_T^3(7,8) = 3 - 3 = 0$.

Измененный сетевой график представлен в приложении 4.

После ускорения работы (7,8) возникли следующие изменения:

- затраты на работу (7,8) возросли на 1000 руб/день, за 3 дня равны 3000 рублей, и общие затраты на проект составили $16904200 + 3000 = 16907200$ руб.

- длительность проекта $T_{кр}^3 = 370$ дней;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

- подкритические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 363$ дня

4 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (10,11) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения обоих критических путей будет ускорение работы (11,14), принадлежащей обоим критическим путям $k(11,14) = 4000$ руб/день $z_T^3 = z_{\max}(11,14) = 5$ дней;

$\Delta T^3 = T_{кр}^3 - T_{нк}^3 = 370 - 363 = 7$ дней; $\Delta t^4 = \min\{5, 7\} = 5$ дней. Новая текущая длительность работы $t_T^4(11,14) = 17 - 5 = 12$ дней; $z_T^4(11,14) = 12 - 12 = 0$.

Измененный сетевой график представлен в приложении 5.

После ускорения работы (11,14) возникли следующие изменения:

- затраты на работу (11,14) возросли на 2000 руб/день, за 5 дней равен 10000 рублей, и общие затраты на проект составили $16907200 + 10000 = 16917200$ руб.

- длительность проекта $T_{кр}^4 = 365$ дня;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

- подкритические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 363$ дня.

5 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (11,14) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения критического пути будет сокращение работы (10,11), принадлежащей обоим критическим путям $k(10,11) = 3000$ руб/день $z_T^4(10,11) = 5$ дней;

$\Delta T^4 = T_{кр}^4 - T_{нк}^4 = 365 - 363 = 2$ дня; $\Delta t^5 = \min\{5, 2\}$ дня. Новая текущая длительность работы $t_T^5(10,11) = 55 - 2 = 53$ дня, $z_T^5(10,11) = 53 - 53 = 0$.

Измененный сетевой график представлен в приложении 6.

После ускорения работы (10,11) возникли следующие изменения:

- затраты на работу (10,11) возросли на 3000 руб/день, за 2 дня равна 6000 рублей, и общие затраты на проект составили $16917200 + 6000 = 16922200$ руб.

- длительность проекта $T_{кр}^5 = 363$ дня;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

- подкритические пути :

(1,2)(2,4)(4,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,4)(4,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 281$ день.

6 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (10,11) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения критического пути будет сокращение работы (2,3), принадлежащей обоим критическим путям

$k(2,3) = 4000$ руб/день; $z_T^6 = z_{\max}(2,3) = 5$ дней;

$\Delta T^5 = T_{кр}^5 - T_{нк}^5 = 319 - 314 = 5$ дней; $\Delta t^6 = \min\{5, 82\} = 5$ дней. Новая текущая длительность работы $t_T^6(2,3) = 70 - 5 = 65$ дней; $z_T^6(2,3) = 65 - 65 = 0$.

Измененный сетевой график представлен в приложении 7.

После ускорения работы (2,3) возникли следующие изменения:

- затраты на работу (2,3) возросли на 4000 руб/день, за 5 дней равна 20000 рублей, и общие затраты на проект составили $16922200 + 20000 = 16942200$ руб.

- длительность проекта $T_{кр}^6 = 358$ дней;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

- подкритические пути:

(1,2)(2,4)(4,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,4)(4,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 281$ день.

7 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (2,3) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения критического пути будет сокращение работы(12,13), $k(12,13) = 4000$ руб/день; $z_T^6 = z_{\max}(12,13) = 10$ дней; $\Delta T^6 = T_{кр}^6 - T_{нк}^6 = 358 - 281 = 77$ дней; $\Delta t^7 = \min\{10, 77\} = 10$ дней. Новая текущая длительность работы $t_T^7(12,13) = 30 - 10 = 20$ дня; $z_T^7(12,13) = 20 - 20 = 0$. Измененный сетевой график представлен в приложении 8.

После ускорения работы (12,13) возникли следующие изменения:

- затраты на работу(12,13) возросли на 4000 руб/день, за 10 дней=40000 рублей, и общие затраты на проект составили $16942200 + 40000 = 16982200$ руб.;

- длительность проекта $T_{кр}^7 = 348$ дней;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

- подкритические пути:

(1,2)(2,4)(4,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,4)(4,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 271$ день.

8 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (12,13) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения критического пути будет сокращение работы (1,2) $k(1,2) = 4545,45$ руб/день, $z_T^7 = z_{\max}(12,13) = 33$ дня; $\Delta T^7 = T_{кр}^7 - T_{нк}^7 = 348 - 271 = 77$ дней; $\Delta t^8 = \min\{33, 77\} = 33$ дня. Новая текущая длительность работы $t_T^8(1,2) = 160 - 33 = 127$ дней; $z_T^8(1,2) = 127 - 127 = 0$.

Измененный сетевой график представлен в приложении 9.

После ускорения работы (1,2) возникли следующие изменения:

- затраты на работу(1,2) возросли на 4545,45 руб/день, за 33 дня равна 150000 рублей, и общие затраты на проект составили $16982200 + 150000 = 17197200$ руб.

- длительность проекта $T_{кр}^8 = 315$ дней;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

- подкритические пути:

(1,2)(2,4)(4,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,4)(4,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 238$ дней.

Поскольку на данном шаге работа (1,2) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения критического пути будет сокращение работы(8,9) $k(8,9) = 8000$ руб/день $z_T^8(8,9) = 5$ дней, $\Delta T^8 = T_{кр}^8 - T_{нк}^8 = 315 - 238 = 77$ дней; $\Delta t^9 = \min \{ \}$ дней. Новая текущая длительность работы $t_T^9(8,9) = 25 - 5 = 20$ дней, $t_T^9(8,9) = 25 - 5 = 20$ дней $z_T^9(8,10) = 25 - 5 = 20$ дней $z_T^9(8,9) = 20 - 20 = 0$. Измененный сетевой график представлен в приложении 10.

После ускорения работ (8,9) и (8,10) возникли следующие изменения:

- затраты на работу(8,9) и (8,10) возросли на 24278 руб/день, за 6 дней равны 145668 рублей, и общие затраты на проект составили $16540799 + 145668 = 16686467$ руб.

- длительность проекта $T_{кр}^9 = 310$ день;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

- подкритические пути:

(1,2)(2,4)(4,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,4)(4,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 233$ дня.

10 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (8,9) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения

критического пути будет сокращение работы(3,6) $k(3,6) = 10000$ руб/день,
 $z_T^9(3,6) = 5$ дней, $\Delta T^9 = T_{кр}^9 - T_{нк}^9 = 310 - 233 = 77$ дней; $\Delta t^{10} = \min\{5, 77\} = 5$ дней.

Новая текущая длительность работы $t_T^{10}(3,6) = 15 - 5 = 10$ дней;
 $z_T^{10}(3,6) = 10 - 10 = 0$. Измененный сетевой график представлен в приложении 11.

После ускорения работы (3,6) возникли следующие изменения:

- затраты на работу(3,6) возросли на 10000 руб/день, за 5 дней равны 50000 рублей, и общие затраты на проект составили $17237200 + 50000 = 17287200$ руб.

- длительность проекта $T_{кр}^{10} = 305$ дней;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

- подкритические пути:

(1,2)(2,4)(4,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,4)(4,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 233$ дня.

11 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (3,6) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения критического пути будет сокращение работы (13,14), $k(13,14) = 10000$ руб/день
 $z_T^{10}(13,14) = 3$ дня, $\Delta T^{10} = T_{кр}^{10} - T_{нк}^{10} = 305 - 233 = 72$ дня; $\Delta t^{11} = \min\{3, 72\} = 3$ дней.

Новая текущая длительность работы $t_T^{11}(13,14) = 15 - 3 = 12$ дней;
 $t_T^{11}(13,14) = 20 - 3 = 17$ $z_T^{11}(8,10) = 17 - 17 = 0$. Измененный сетевой график представлен в приложении 12.

После ускорения работы (13,14) возникли следующие изменения:

- затраты на работу(13,14) возросли на 10000 руб/день, за 3 дня равны 30000 рублей, и общие затраты на проект составили $17287200+30000=17317200$ руб.

- длительность проекта $T_{кр}^{11} = 302$ дня;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

- подкритические пути:

(1,2)(2,4)(4,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,4)(4,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 230$ дней.

12 шаг:

Поскольку на данном шаге работа (13,14) исчерпала свой запас времени ускорения, то наиболее дешевым вариантом сокращения критического пути будет сокращение работы(9,12), $k(9,12)=33333,33$ руб/день $z_T^{10}(9,12) = 3$ дня, $\Delta T^{11} = T_{кр}^{11} - T_{нк}^{11} = 302-230 = 72$ дня

$\Delta t^{12} = \min\{3, 72\} = 3$ дня. Новая текущая длительность работы $t_T^{12}(9,12)=30-3 = 27$ дней; $t_T^{10}(8,10)=17-3=14$ $z_T^{12}(9,12)=27-27=0$.

Измененный сетевой график представлен в приложении 13.

После ускорения работы (9,12) возникли следующие изменения:

- затраты на работу(9,12) возросли на 33333,33 руб/день, за 3 дня равна 100000 рублей, и общие затраты на проект составили $17317200+100000=17417200$ руб.

- длительность проекта $T_{кр}^{12} = 299$ дня;

- критические пути:

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

(1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15)

- подкритические пути:

(1,2)(2,4)(4,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)

(1,2)(2,4)(4,8)(8,9)(9,12)(12,13)(13,14)(14,15). $T_{нк}^0 = 227$ дней.

Дальнейшая оптимизация стала невозможной, поскольку все работы критического пути $L_{кр}^0 = (1,2)(2,3)(3,6)(6,7)(7,8)(8,10)(10,11)(11,14)(14,15)$ исчерпали свой запас времени ускорения, а значит, проект не может быть выполнен меньше, чем за $T_{кр}^{12} = T_{кр}^{12} = 299$ дней.

Таким образом при отсутствии ограничений на затраты минимально возможная длительность проекта составляет $T_{кр}^{12} = 299$ дней. Сокращение длительности проекта с 380 до 299 дней потребовало $17417200 - 16901000 = 516200$ руб. прямых затрат.

В отличие от прямых затрат при уменьшении продолжительности проекта косвенные затраты ($C_k = 102934$ руб/день) убывают. Минимум общих затрат соответствует продолжительности проекта 299 дней.

Если же учитывать ограничение по средствам, выделенным на выполнение проекта, $C_0 = 17200000$ рублей, то оптимальным является выполнение проекта так же за 299 дней.

В ходе исследования были решены задачи:

1. Выполняя этап структурного планирования проект был разбит на четко определенные операции, для которых определялась продолжительность. Затем был построен сетевой график, который представляет взаимосвязи работ проекта. Это позволило детально

проанализировать все работы и внести улучшения в структуру проекта еще до начала его реализации.

2. Выполняя этап календарного планирования был построен календарный график, в котором были определены моменты начала и окончания каждой работы и другие временные характеристики сетевого графика, которым необходимо уделять особое внимание, чтобы закончить проект в срок. Во время календарного планирования были определены временные характеристики всех работ с целью проведения в дальнейшем оптимизации сетевой модели.

3. В ходе оперативного управления использовались сетевой и календарный графики для составления периодических отчетов о ходе выполнения проекта. При этом сетевая модель подвергалась оперативной корректировке, вследствие чего разрабатывался новый календарный план остальной части проекта.

4. был проведен анализ по перераспределению и выравниванию ресурса рабочей силы на протяжении срока выполнения проекта, и результаты отражены на графике.

5. была проведена оптимизация сетевой модели строительства нового магазина по критерию «Время - затраты» и получены следующие результаты: при отсутствии ограничений на затраты минимально возможная длительность проекта составляет $T_{кр}^{10} = 299$ дней. Сокращение времени проекта составило 81 день, (с 380 до 299 дней), что потребовало $17417200 - 16901000 = 516200$ руб. прямых затрат. Если же учитывать ограничение по средствам, выделенным на выполнение проекта, $C_0 = 16881200$ рублей, то оптимальным является выполнение проекта так же за 288 дней.

3.4 Программная реализация задач сетевого планирования

Программа «Сетевая модель проведения строительно-монтажных работ» была написана на языке Object Pascal в среде Delphi 6.0 (приложение 14) [54,55].

Она является средством автоматизированного построения, расчета и оптимизации сетевых моделей различных проектов выполнения работ, т.е. представителем подсистемы планирования и управления. Здесь происходит построение сетевой модели, расчет временных параметров работ и событий, оптимизация по времени и затратам. Значительная гибкость подсистемы позволяет использовать ее не только для планирования строительно-монтажных работ строительства магазина, но и для планирования тех работ, которые можно представить в виде сетевой модели, т.е. практически на любых производствах и предприятиях [17,53] .

Рассмотрим положительный эффект использования этого представителя подсистемы ПУ. Он будет складываться:

- в основном из более рационального распределения работ, при котором более эффективно будет использоваться время всего проекта и оптимизированы затраты на выполнение работ;

- из экономии времени на подобные расчеты;

Входные данные:

Необходимые для расчета данные состоят из:

- обозначения событий, образующих работу (например: 1-2), указывается начало и конец работы;

- ввода продолжительности работы (в днях) в нормальном и ускоренном режиме;

- ввода стоимости работ (в рублях) нормальной и повышенной;
- указание количества событий в модели $n > 4$.

Ввод данных осуществляется либо в ручную, либо из сохраненного файла.

Ввод данных в ручную осуществляется: нажатием на кнопку внести в список на главной форме программы.

Для сохранения внесенных параметров в файл нужно выбрать пункт меню «Файл- Сохранить параметры в файл».

После внесения всех событий необходимо нажать кнопку «закончить ввод», появится окошечко «информация...», где указывается сколько событий и работ в параметры сетевой модели было внесено. После нажатия кнопки ОК открывается окошечко сетевая модель, где и происходит визуальное построение сетевой модели (приложение 18). В окошечке справа расположены события, после внесения на форму сетевая модель последнего события происходит автоматическое построение сетевой модели с указанием длительности каждой из работ. При наведении курсора мыши на одно из событий или работу справа в графе параметры появляются основные параметры, указывается код работы, нормальная длительность, ускоренная, текущая, ранний срок начала, поздний срок начала, ранний срок окончания, поздний срок окончания, полный и свободный резервы времени работ. Для событий указывается номер события, раннее время, позднее время, резерв времени. После нажимаем кнопку «оптимизация», появляется окошечко, где указывается за какое минимально возможное время можно закончить проект и указывается сколько дополнительных затрат это потребовало. Затем нажимаем кнопку «вернуться к сетевому графику», после чего возвращаемся к исходному сетевому графику, но уже после

оптимизации. И все временные параметры указываются после оптимизации.

Модуль SR содержит описание и реализацию классов событий и работ, функций обеспечивающих работу модели. Он состоит из следующих процедур:

procedure ClearParam

происходит описание класса «СОБЫТИЕ»и класса «РАБОТА».

procedure InitVars

инициализация массивов событий и работ, и переменных.

Procedure CalculateNet процедура расчета элементов сетевой модели: рассчитываем у событий T_ranee, T-posdnee, Reserv.

Procedure CalculateJobTimeParam процедура расчета временных параметров работ.

Procedure FindPaths процедура нахождения путей в сетевой модели.

Procedure OptimizationYimeExpenseses оптимизация по критерию «время- затраты».

Описание системы

Требования к аппаратному обеспечению: для использования программы «Сетевая модель проведения строительно- монтажных работ»:необходим компьютер, конфигурация которого позволяет запустить на нем язык визуального программирования DELPHI 6.0. [55]

При выборе системы программирования рассматривались следующие качества:

- возможность хранения больших объемов данных;
- малая требовательность к ресурсам компьютера;
- обеспечение сохранности данных.

Наиболее подходящим оказался язык визуального программирования DELPHI 6.0.

Данная система позволяет создавать удобный интерфейс пользователя для ввода, обработки и хранения данных.

Внешние спецификации: интерфейс пользователя представляет собой набор элементов управления, расположенных в диалоговом окне.

Программа построения сетевой модели, расчета временных параметров работ и событий, оптимизации сетевой модели по критерию «Время- затраты» расположена в приложении 14.

Практическая значимость исследования заключается в том, что значительная гибкость программы позволяет использовать ее не только для планирования строительно - монтажных работ, но и для планирования тех работ, которые можно представить в виде сетевой модели, т.е. практически на любых производствах и предприятиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях все более сложными становятся социально-экономические системы. Поэтому решения, принимаемые по проблемам рационализации их развития, должны получать строгую научную основу на базе математико-экономического моделирования [28, 31,36].

Одним из методов научного анализа является сетевое планирование. Необходимость использования методов сетевого планирования в исследовании систем управления объясняется многим разнообразием моделей планирования: графики и таблицы, физические модели, логические и математические выражения, машинные модели, имитационные модели.

Особый интерес представляет сетевой метод формализованного представления систем управления, который сводится к построению сетевой модели для решения комплексной задачи управления. Основой сетевого планирования является информационная динамическая сетевая модель.

Существенную роль в повышении эффективности общественного производства при переходе к рыночным методам выполняет социально-экономическое прогнозирование и планирование на основе построенной модели [25, 26, 30]. При этом важным средством реализации прогнозов и планов снова является сетевое планирование.

Сетевое планирование — метод анализа сроков (ранних и поздних) начала и окончания нереализованных частей проекта, позволяет увязать выполнение различных работ и процессов во времени, получив прогноз общей продолжительности реализации всего проекта [50,51].

Методы сетевого планирования могут успешно применяться для оптимизации планирования и управления сложными, разветвленными комплексами работ, которые требуют участия большого количества исполнителей и затрат ограниченных ресурсов.

Можно отметить, что сетевое планирование представляет метод управления, основывающийся на использовании математического аппарата теории графов и системного подхода для отображения и алгоритмизации комплексов взаимосвязанных работ для достижения четко поставленных целей – сокращение до минимума продолжительности проекта.

Применение методов СПУ, реализуемых с помощью сетевых моделей позволяет:

- детально проанализировать все работы и внести улучшения в структуру проекта еще до начала его реализации;
- выявить критические операции, которым необходимо уделить особое внимание, чтобы закончить проект в директивный срок;
- сформировать календарный план реализации некоторого комплекса работ;
- выявить и мобилизовать резервы времени, трудовые, материальные и денежные ресурсы;
- изыскать дополнительные резервы времени и материальных ресурсов;
- проанализировать ресурсы рабочей силы по критерию «минимум исполнителей»;
- провести оптимизацию по критерию «время-затраты», с целью сокращения времени проекта в целом;

- создать программное обеспечение, которое реализует все поставленные задачи.

Практическая ценность таких исследований заключается:

- в возможности осуществлять управление комплексом работ по принципу “ведущего звена” с прогнозированием и предупреждением возможных срывов в ходе работы;

- в повышении эффективности управления в целом при четком распределении ответственности между руководителями разных уровней и исполнителями работ;

- в написании программы на компьютере которая позволяет оптимизировать сетевую модель по критерию «Время - затраты».

В монографии рассмотрен широко распространённый метод исследования экономических задач планирования и управления на основе сетевых моделей.

Этот метод предназначен для формирования календарного плана реализации комплексов операций и принятия эффективных решений в процессе его реализации. Как комплекс операций можно рассматривать строительство некоторого здания, корабля или другого сложного объекта или разработку проекта этого сооружения и даже процесс построения плана разработки проекта- в общем всякую задачу, для выполнения которой необходимо осуществить большое число разнообразных работ. Проблемы, для которых могут быть использованы сетевые методы планирования и управления, встречаются постоянно, начиная от деятельности отдельных людей и кончая проектами, в реализации которых участвуют сотни организаций и десятки тысяч людей (например, создание крупного территориально - производственного комплекса).

Методы сетевого моделирования относятся к методам принятия оптимальных решений. Анализ сетевой модели, представленной в графической или табличной (матричной) форме, позволяет: во-первых, более чётко выявить взаимосвязи этапов реализации проекта и во-вторых, определить наиболее оптимальный порядок выполнения этих этапов в целях, например, сокращения сроков выполнения всего комплекса работ [3,4].

Преимущества моделей сетевого планирования и управления обеспечивают своевременное внесение корректив в процесс управления и в работу различных управленческих органов, эффективное предвидение будущего и надлежащего воздействия на ход выполнения работ [41]. Обеспечиваются также необходимые условия для применения опыта, творческих возможностей человека на этапах постановки задач, корректировки хода их решения и оценки конечных результатов. Управленческие работники освобождаются от рутинной деятельности.

Диапазон применения сетевого планирования и управления весьма широк: от задач, касающихся деятельности отдельных лиц, до проектов, в которых участвуют сотни организаций и десятки тысяч людей. Методы сетевого планирования и управления обеспечивают руководителей и исполнителей на всех участках работы обоснованной информацией, которая необходима им для принятия решений по планированию, организации и управлению. А при использовании вычислительной техники сетевое планирование и управление является уже не просто одним из методов планирования, а автоматизированным методом управления производственным процессом.

Сетевые модели могут быть широко использованы на всех отечественных предприятиях при разработке как долгосрочных, так и

текущих планов. Сетевое планирование позволяет не только определять потребность различных производственных ресурсов в будущем, но и координировать их рациональный расход в настоящем [18, 75].

Таким образом, в монографии рассмотрен широко распространённый метод исследования задач планирования и управления - метод критического пути [10,60]. Метод расчета критического пути позволяет просчитать возможные календарные графики выполнения комплекса работ на основе описанной логической структуры сети и оценок продолжительности выполнения каждой работы, определить критический путь для проекта в целом.

Решение экономических задач с помощью метода математического моделирования позволяет осуществлять эффективное управление как отдельными производственными процессами на уровне прогнозирования и планирования экономических ситуаций и принятия на основе этого управленческих решений, так и всей экономикой в целом [29, 23, 34].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абланская Л.В. Экономико-математическое моделирование / Л.В. Абланская, Л.О. Бабешко, Л.И. Баусов. - М.: Экзамен, 2006г. - 800с.
2. Абрашин Е.А. Экономико-математические методы и модели: учебное пособие / Е.А. Абрашин, В.А. Комаров. - Волгоград: Волгоградский институт бизнеса, Вузовское образование, 2009.- 207 с.
3. Алексеев В.М. Оптимальное управление / В.М. Алексеев, В.М. Тихомиров, С.В. Фомин. - Москва: Огни, 2008. - 125 с.
4. Алексеев Г.В. Численное экономико-математическое моделирование и оптимизация / Г.В. Алексеев. - СПб.: Гиорд, 2014. - 272 с.
5. Алексеенко В.Б. Математические модели в экономике: учебное пособие / В.Б. Алексеенко, Ю.С. Коршунов, В.А. Красавина. - М.: Российский университет дружбы народов, 2013.- 80 с.
6. Алексинская Т. В.: учебное пособие по решению задач по курсу Экономико-математические методы и модели – М. : Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 153 с.
7. Андриевский Б.Р. Избранные главы теории автоматического управления / Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. - Москва: СИНТЕГ, 2015. - 400 с.
8. Баев И.А. Экономико-математическое моделирование управления фирмой / И.А. Баев, В.И. Ширяев, Е.В. Ширяев. - М.: КомКнига, 2005г. - 224с.
9. Баканов М.И. Теория экономического анализа: учебник / М.И. Баканов, А.Д. Шеремет. - М.: Финансы и статистика, 1997.

10. Балаш В. А. Имитационное моделирование и его приложения / В. А. Балаш, О. С. Кузнецова, С. Н. Купцов. – М. : Наука, 2008. – 286 с.
11. Барсук В. А. Математические методы планирования и управления в хозяйстве связи / В.А. Барсук, Н.М. Губин. - М.: Связь, 2008. - 340 с.
12. Бокс Дж. Анализ временных рядов прогноз и управление (часть 2) / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. - Москва: СИНТЕГ, 2008. - 521 с.
13. Браверман Э. М. Математические модели планирования и управления в экономических системах. учебное пособие / Э.М. Браверман. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", 2007. - 368 с.
14. Бродецкий Г.Л. Экономико-математические методы и модели в логистике: процедуры оптимизации: учеб. для студентов учреждений высшего профессионального образования / Г.Л. Бродецкий. - М.: ИЦ Академия, 2012. - 288 с.
15. Вентцель Е.С. Исследование операций – М. : Советское радио, 1972. – 550 с.
16. Вероятностное планирование строительства объектов.<http://prosvet.su/articles/menagement/article1/>
17. Галисеев, Г.В. Программирование в среде Delphi 6:-М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
18. Гармаш А.Н. Экономико-математические методы и прикладные модели: учебник для бакалавриата и магистратуры / А.Н. Гармаш, И.В. Орлова, В.В. Федосеев. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 328 с.
19. Гетманчук А.В. Экономико-математические методы и модели: учебное пособие / А.В. Гетманчук, М.М. Ермилов. - М.: Дашков и К, 2015. - 188 с.

20. Гладких Б.А. Методы оптимизации и исследование операций для бакалавров информатики. Ч. IV. Сетевое планирование и массовое обслуживание: учебное пособие. — Томск: Изд-во НТЛ, 2013. - 164 с.

21. Голенко Д.И. Статистические методы сетевого планирования и управления. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968. - 400 с.

22. Дегтярева Н.А. Информационные системы в экономике: лабораторный практикум для студентов: учебное пособие / Н.А. Дегтярева. – Челябинск: Цицеро, 2018. - 106 с.

23. Дегтярева Н.А. Использование информационных технологий в управлении / Н.А. Дегтярева, И.Д. Колмакова // Вестник факультета управления Челябинского государственного университета. Серия: «Управление». – 2016.- № 1. - С. 99 - 101.

24. Дегтярева Н.А. Математическая статистика: учебно-практическое пособие / Н.А. Дегтярева. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал гос.гуман.- пед. ун-та, 2018. – 122 с.,

25. Дегтярева Н.А. Модели анализа и прогнозирования на основе временных рядов: монография / Н.А. Дегтярева. - Челябинск: Изд-во ЗАО «Библиотека А.Миллера», 2018.- 160 с.

26. Дегтярева Н.А. Повышение экономической эффективности функционирования крестьянских (фермерских) хозяйств в условиях рынка: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Дегтярева Н.А.; Челябинская государственная агроинженерная академия. - Челябинск, 2000. - 218 с.

27. Дегтярева Н.А. Практикум по экономико-математическим методам и моделям: учебное пособие для студентов / Н.А. Дегтярева. - Челябинск: Изд-во ЗАО «Библиотека А.Миллера», 2019.- 97 с.

28. Дегтярева Н.А. Применение статистических методов исследования в сельском хозяйстве / Н.А. Дегтярева, Н.А.Берг

//Известия высших учебных заведений. Уральский регион. – 2017. - № 1.
– С.42-47.

29. Дегтярева Н.А. Применение экономико-математических моделей для принятия управленческих решений / Н.А. Дегтярева // Сборник: Конкурентоспособность и развитие социально-экономических систем. Материалы Всероссийской научной конференции памяти академика А.И. Татаркина. Под ред. В.И. Бархатова, Д.А. Плетнёва. 2017. – С. 62 – 64.

30. Дегтярева Н.А. Применение экономико-математических моделей для принятия управленческих решений по повышению конкурентоспособности предприятия / Н.А. Дегтярева // Региональная конкурентоспособность и образование в контексте глобальных вызовов: сборник материалов международной научно-практической конференции – IV уральский вернисаж науки и бизнеса, 3 марта 2017.

31. Дегтярева Н.А. Принятие эффективных управленческих решений на основе эконометрического прогнозирования. / Н.А. Дегтярева, Н.А. Берг // Вестник Челябинского государственного университета. Серия: «Экономические науки». - № 4 (414) 2018. вып. 61. – С. 176-183.

32. Дегтярева Н.А. Сборник задач по статистике: учебное пособие для студентов / Н.А. Дегтярева. – Челябинск: Цицеро, 2017. – 90 с.

33. Дегтярева Н.А. Сборник задач по экономико-математическим методам и моделям: учебное пособие для студентов / Н.А. Дегтярева. – Челябинск: Цицеро, 2017. – 77 с.

34. Дегтярева Н.А. Эконометрическое моделирование производственной эффективности / Н.А. Дегтярева, Д.С. Гордеева, Матвеева П.А., Маатвеев В.В., Борисенко Я.М. Федосеев // Азимут

научных исследований. Серия: «Экономика и управление». — 2019. — Т. 8, № 2 (27). — С.133–135.

35. Дегтярева Н.А. Экономико-математические методы и модели. Конспекты лекций: учебное пособие для студентов / Н.А. Дегтярева. - Челябинск: Изд-во ЗАО «Библиотека А.Миллера», 2019.- 82 с.

36. Дегтярева Н.А. Эконометрические модели анализа и прогнозирования: монография / Н.А. Дегтярева. – Челябинск: Цицеро, 2017. – 170 с.

37. Дрогобыцкий И.Н. Экономико-математическое моделирование: М.: Экзамен, 2004г. - 323с.

38. Заболотский В.П. Математические модели в управлении: учеб. пособие / В.П. Заболотский А.А. Степанов, А.Г. Оводенко.- СПбГУАП. СПб., 2001. - 196 с.

39. Забудский Г.Г. Математическое моделирование в экономике: учебное пособие / Г.Г. Забудский. - Электрон.текстовые данные.- Омск: Омский государственный университет, 2008.- 91 с.

40. Зубанов Ф. Microsoft Windows 2000. Планирование. Развертывание. Управление / Ф. Зубанов. - М.: Наука, 2010. - 600 с.

41. Зуховицкий С.И. Математические методы сетевого планирования / С.И. Зуховицкий, И.А. Радчик. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", 2010. - 296 с.

42. Ивасенко А.Г. Управление проектами: учебное пособие / А.Г. Ивасенко, Я.И.Никонова, М.В.Каркавин. – Ростов н/Дону: Феникс, 2009. – 330 с.

43. Ильченко А.Н. Практикум по экономико-математическим методам: учебное пособие / Ильченко А.Н., Ксенофонтова О.Л.,

Канакина Г.В.- Электрон.текстовые данные. - М.: Финансы и статистика, 2014.- 288 с.

44. Казаков О.Л. Экономико-математическое моделирование: учебно-методическое пособие / О.Л. Казаков, С.Н. Миненко, Г.Б. Смирнов. – М.: МГИУ, 2006. - 136 с.

45. Катаргин Н.В. Экономико-математическое моделирование: учебное пособие / Н.В. Катаргин. - СПб.: Лань, 2018. - 256 с.

46. Кобилев А. Г. Муниципальное управление и социальное планирование в муниципальном хозяйстве / А.Г. Кобилев, А.Д. Кирнев, В.В. Рудой. - М.: Феникс, 2012. - 496 с.

47. Колемаев В.А. Математическая экономика: учебник для вузов / В.А. Колемаев. - М. : ЮНИТИ – ДАНА, 2005. – 399 с.

48. Колпаков В.Ф. Экономико-математическое и эконометрическое моделирование: Компьютерный практикум: учебное пособие / В.Ф. Колпаков. - М.: Инфра-М, 2016. - 127 с.

49. Конюховский П.В Математические методы исследования операций в экономике: С-Петербург: Питер 2003г. - 208 с.

50. Кофман А. Н. Сетевые методы планирования – М. : Прогресс 1968. – 177 с.

51. Кофман А.Н. Сетевые методы планирования. Применение системы ПЕРТ и ее разновидностей при управлении производственными и научноисследовательскими проектами / А. Кофман, Г.Дебазей. - М.: Прогресс, 1968. - 182 с.

52. Кремер Н.Ш. Исследование операций в экономике: учебное пособие / Н.Ш. Кремер. - М. : ЮНИТИ, 2009. - 407 с.

53. Кудрявцев Е. М. Microsoft Project. Методы сетевого планирования и управления проектом – М. : ДМК Пресс, 2005. – 240 с.

54. Кудрявцев Е. М. Project 2003. Сетевое планирование и управление проектами / Е.М. Кудрявцев. - М.: ДМК Пресс, 2014. - 240 с.
55. Кудрявцев Е.М. Microsoft Project. Методы сетевого планирования и управления проектом / Е.М. Кудрявцев. - М.: Книга по Требованию, 2009. - 238 с.
56. Кузнецов Б.Т. Математика: учебник / Кузнецов Б.Т.- Электрон.текстовые данные.- М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. - 719 с.
57. Кундышева Е.С. Экономико-математическое моделирование: М.: Дашков и К, 2006г. - 424с.
58. Мазур И. И. Управление проектами / И. И. Мазур, В.Д. Шапиро, Н. Г. Ольдерогге. – М. : Омега-Л, 2004. – 664 с.
59. Макин Дж.С. Внедрение, управление и поддержка сетевой инфраструктуры Microsoft Windows Server 2003. Учебный курс Microsoft (+CD-ROM) / Дж.С. Макин, Йен Маклин,. - М.: СПб: Питер, 2007. - 622 с.
60. Метод критического пути. <http://ru.wikipedia.org/wiki/>
61. Миненко С.Н. Экономико-математическое моделирование производственных систем: М.: ИНФРА-М, 2004г. - 140с.
62. Невежин В.П. Сборник задач по курсу «Экономико-математическое моделирование» : учебное пособие для вузов / В.П. Невежин, Кружилов С.И. - М. : ОАО «Издательский Дом» «Городец», 2005. – 320 с.
63. Оклея П.И. Экономико-математические методы и модели поддержки принятия решений при эксплуатации тепловых электростанций / П.И. Оклея. - М.: Ленанд, 2016. - 160 с.
64. Организация и планирование производства: учеб. пособие/ А.И. Ильиченко. – М.: Издательственный центр «Академия», 2006, 480с.

65. Организация производства: учебник для вузов / О.Г. Туровец, В.Н. Попов, В.Б. Родинов и др.; Под ред. О.Г. Туровца - М.: Экономика и финансы, 2008.-544с.
66. Орлова И.В. Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование: учебное пособие / И.В. Орлова. - М.: Вузовский учебник, НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 389 с.
67. Орлова И.В. Экономико-математические методы и прикладные модели: учебник для бакалавров / И.В. Орлова. - М.: Юрайт, 2013. - 328 с.
68. Попов А.М. Экономико-математические методы и модели: учебник для бакалавров / А.М. Попов. - М.: Юрайт, 2013. - 479 с.
69. Разу М.Л. Управление проектом. Основы проектного управления / М. Л. Разу, А. М. Лялин, Т.М. Бронникова. - М. : КНОРУС, 2006. – 768 с.
70. Ребрин Ю.И. Основы экономики и управления производством. Сетевое планирование и управление [Электронный ресурс] / Ю. Ребрин http://polbu.ru/rebrin_management/ch24_all.html
71. Рейзлин В. И. Математическое моделирование: учебное пособие / В.И. Рейзлин. - М.: Юрайт, 2016. - 128 с.
72. Ржевский, С. В. Исследование операций: учебное пособие / С.В. Ржевский. - М.: Лань, 2013. - 480 с.
73. Семёнов А.Г. Математические модели в экономике: учебное пособие / Семёнов А.Г., Печерских И.А.- Электрон.текстовые данные. - Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2011.- 187 с.
74. Сетевое планирование и управление. Под ред. Голенко Д.И. М., Экономика, 1967.

75. Сетевые графики в планировании. Под ред. Разумова. М., Высшая школа, 1975.

76. Системы автоматического регулирования. Практикум по математическому моделированию (+ CD-ROM). - М.: Феникс, 2015. - 464 с.

77. Стрикалов А.И. Экономико-математические методы и модели: пособие к решению задач / А.И.Стрикалов, И. А. Печенежская. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 348 с.

78. Стронгин Р.Г. Исследование операций. Модели экономического поведения / Р.Г. Стронгин. - М.: Интернет-университет информационных технологий, Бином. Лаборатория знаний, 2016. - 208 с.

79. Таха Х. А. Введение в исследование операций – Вильямс седьмое издание, 2005. – 901 с.

80. Токарев В.В. Модели и решения. Исследование операций для экономистов, политологов и менеджеров / В.В. Токарев. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. - 408 с.

81. Тынкевич М.А. Экономико-математические методы (исследование операций). Изд. 2, испр. и доп. - Кемерово, 2000. -177 с.

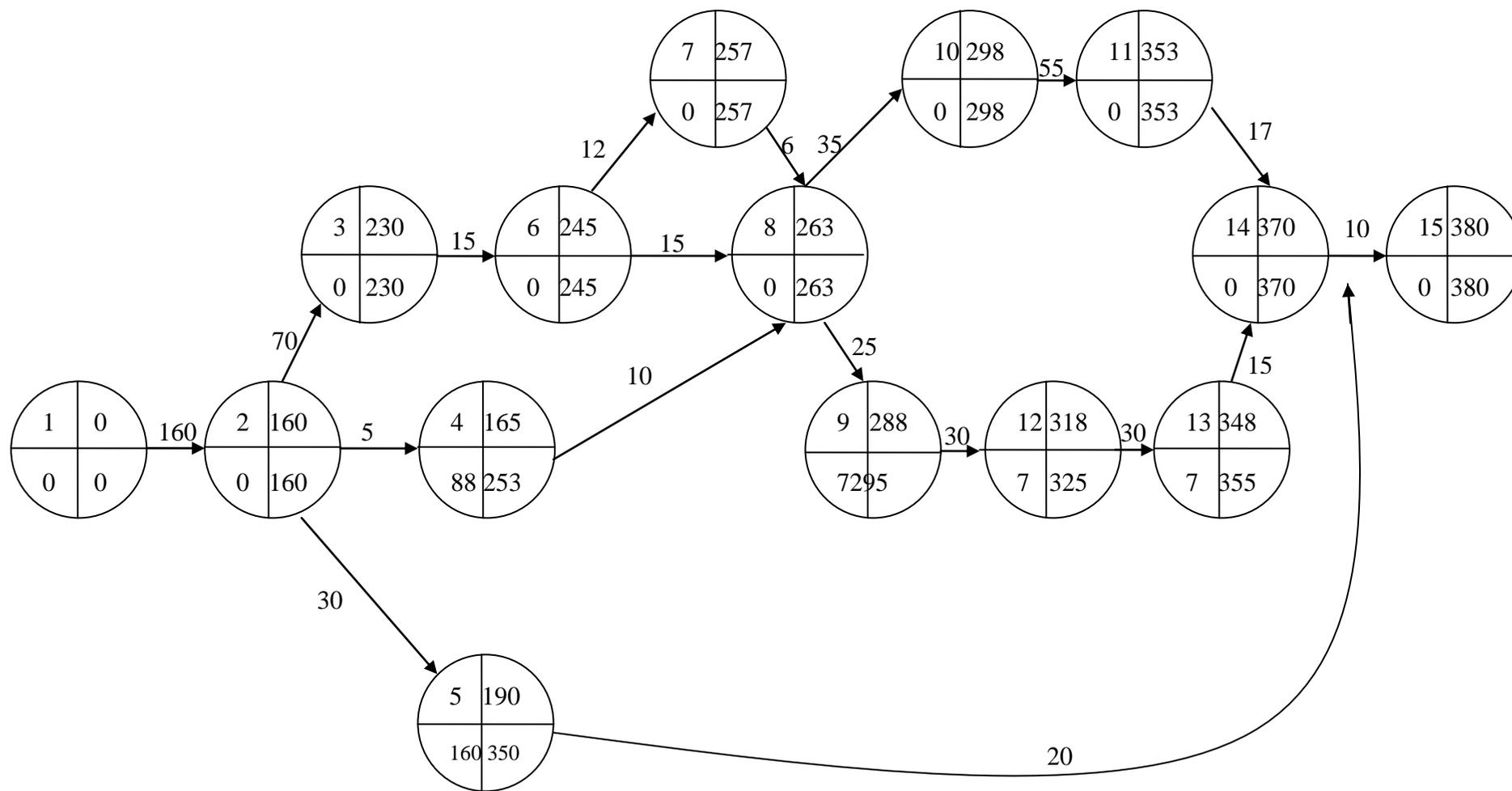
82. Управление проектом. Основы проектного управления: учебник / кол. авт.: под ред. проф. М.Л.Разу. – М.: КНОРУС, 2006. – 768 с.

83. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов / И.М. Федоткин. - М.: Ленанд, 2015. - 416 с.

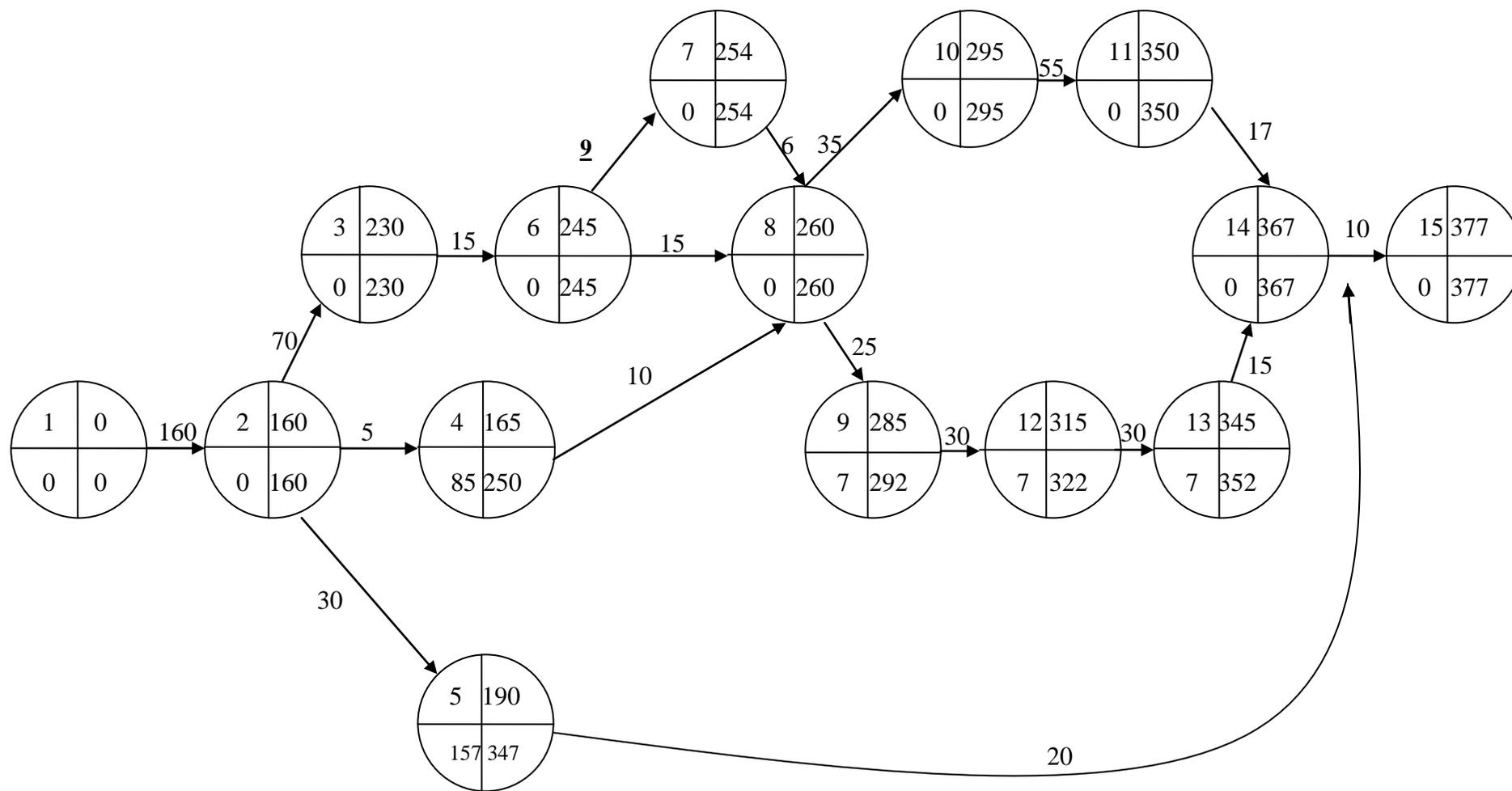
28. Юдин, С. В. Математика и экономико-математические модели. Учебник / С.В. Юдин. - М.: Инфра-М, РИОР, 2016. - 376 с.

84. Фомин Г.П. Математические методы и модели в коммерческой деятельности. - М.: Финансы и статистика, 2001.

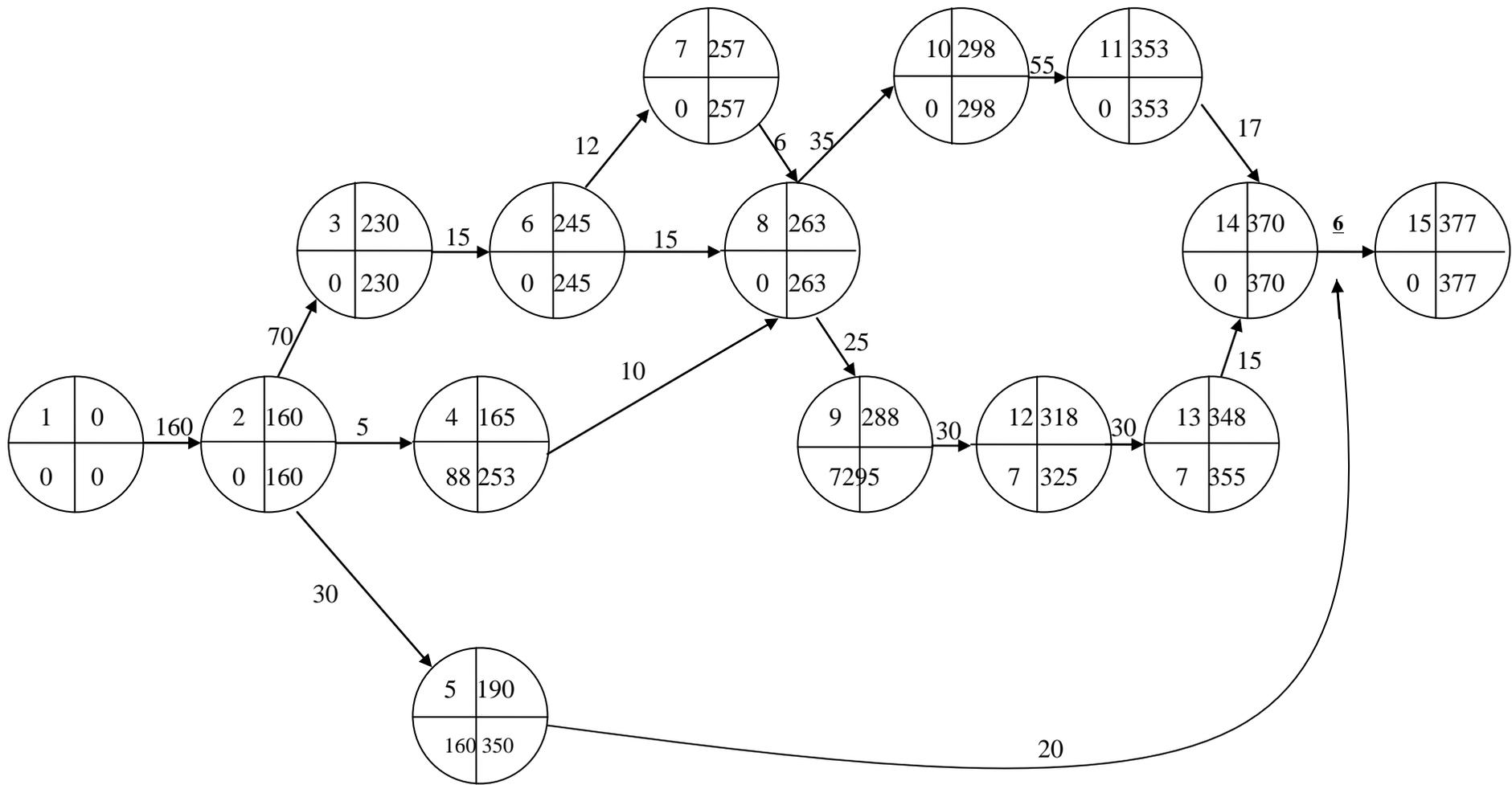
85. Хуснутдинов Р.Ш. Экономико-математические методы и модели: Учебное пособие / Р.Ш. Хуснутдинов. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 224 с.
86. Цеховой А.Ф. Управление проектами: основы теории и практики / А.Ф. Цеховой, М.А. Винницкая, Т.Г. Климова, М.А. Карлинская, = Учеб. изд. — Алматы: Акбар, 2010. — 200 с.
87. Шапкин, А.С. Математические методы и модели исследования операций : учебник / А.С. Шапкин, Н.П. Мазаева. - М. : Издательско-торговая корпорация "Дашков и К", 2004. - 400 с.
88. Шелобаев С.И.. Математические методы и модели в экономике, финансах, бизнесе. М.:ЮНИТИ-ДАНА, 2000.
89. Шикин Е.В. Математические методы и модели в управлении. - М.:Дело,2000.
90. Экономико-математические методы и прикладные модели: учебное пособие / В.В. Федосеев [и др.].- Электрон.текстовые данные.- М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012.- 304 с.
91. Юденков А.В. Математическое программирование в экономике: учебное пособие / А.В. Юденков, М.И. Дли, В.В. Круглов. – М.: Финансы и статистика, 2010. – 240 с.
92. Юдович В. И. Математические модели естественных наук / В.И. Юдович. - М.: Лань, 2011. - 336 с.
93. Юмагулов, М. Г. Введение в теорию динамических систем: учебное пособие / М.Г. Юмагулов. - М.: Лань, 2015. - 272 с.



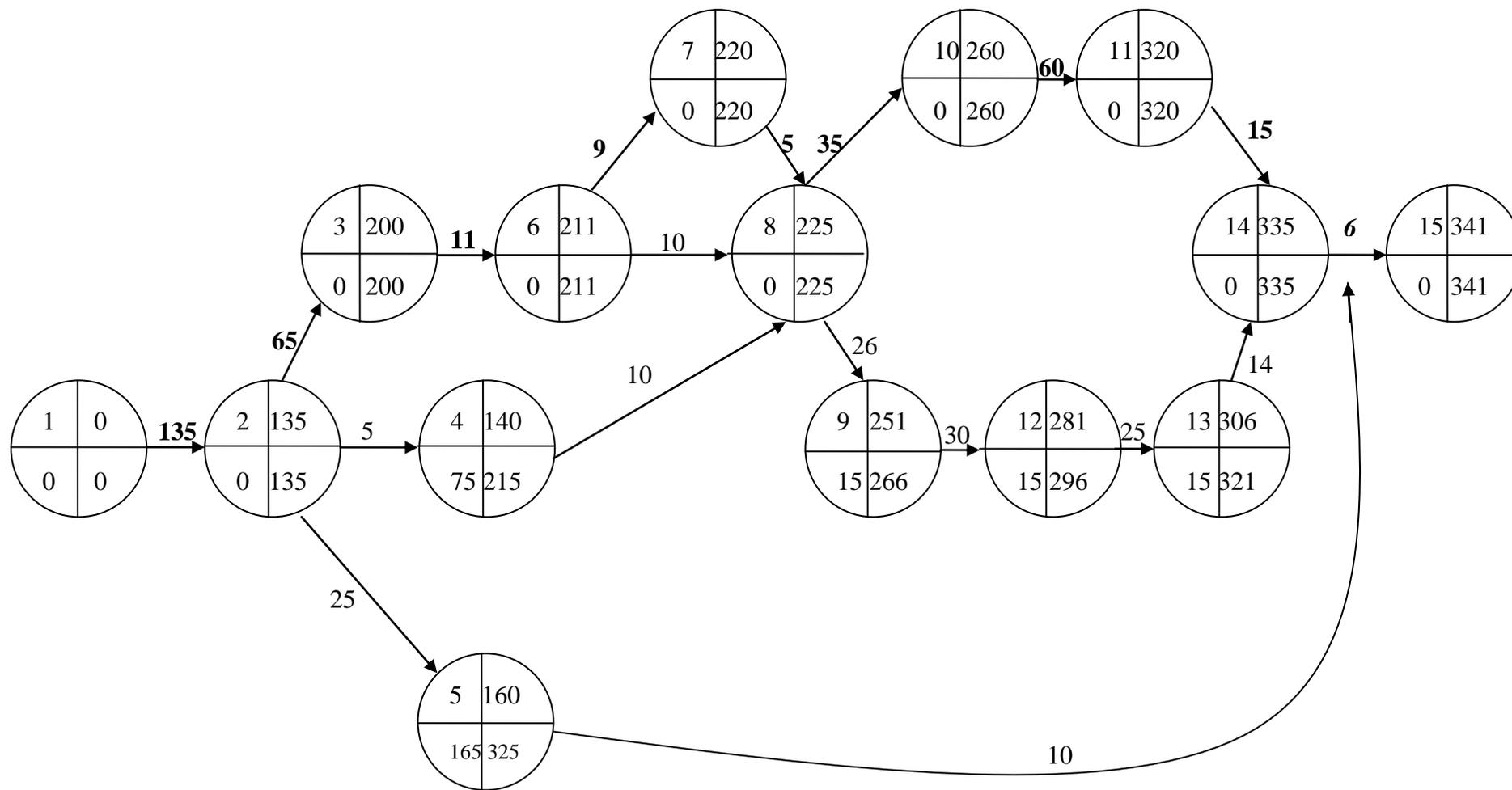
Исходная сетевая модель



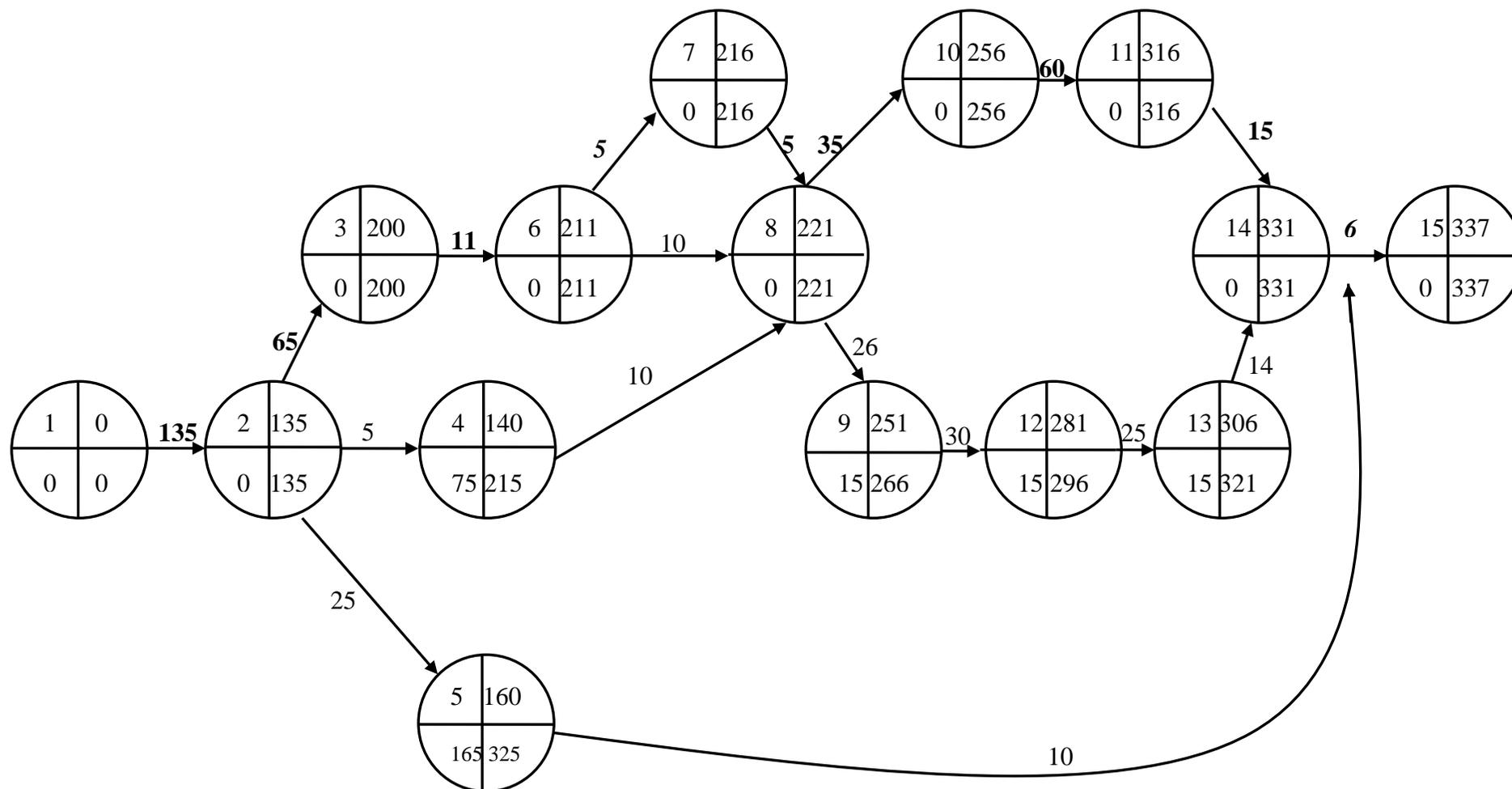
Сетевая модель после первого шага оптимизации



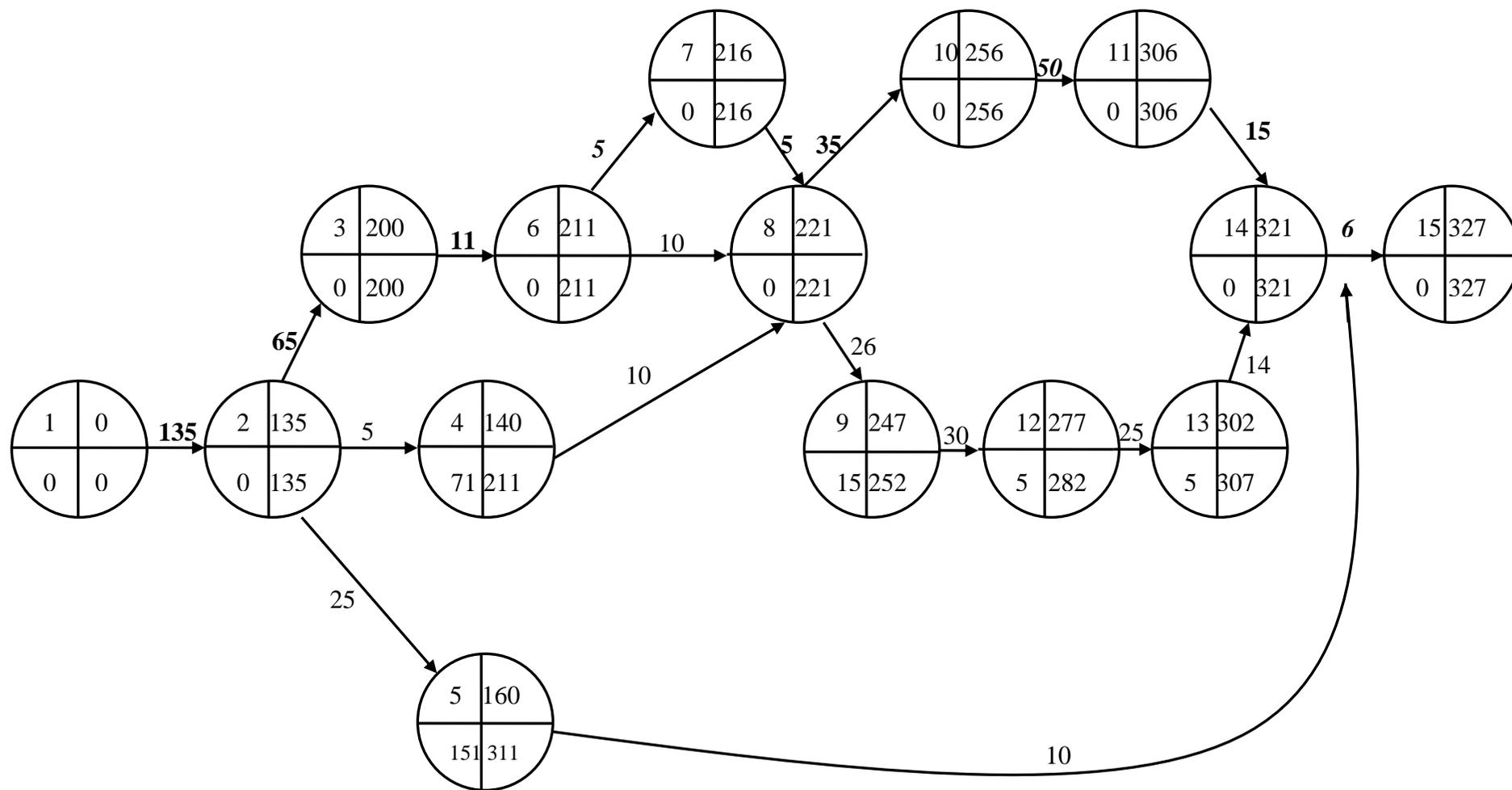
Сетевая модель после второго шага оптимизации

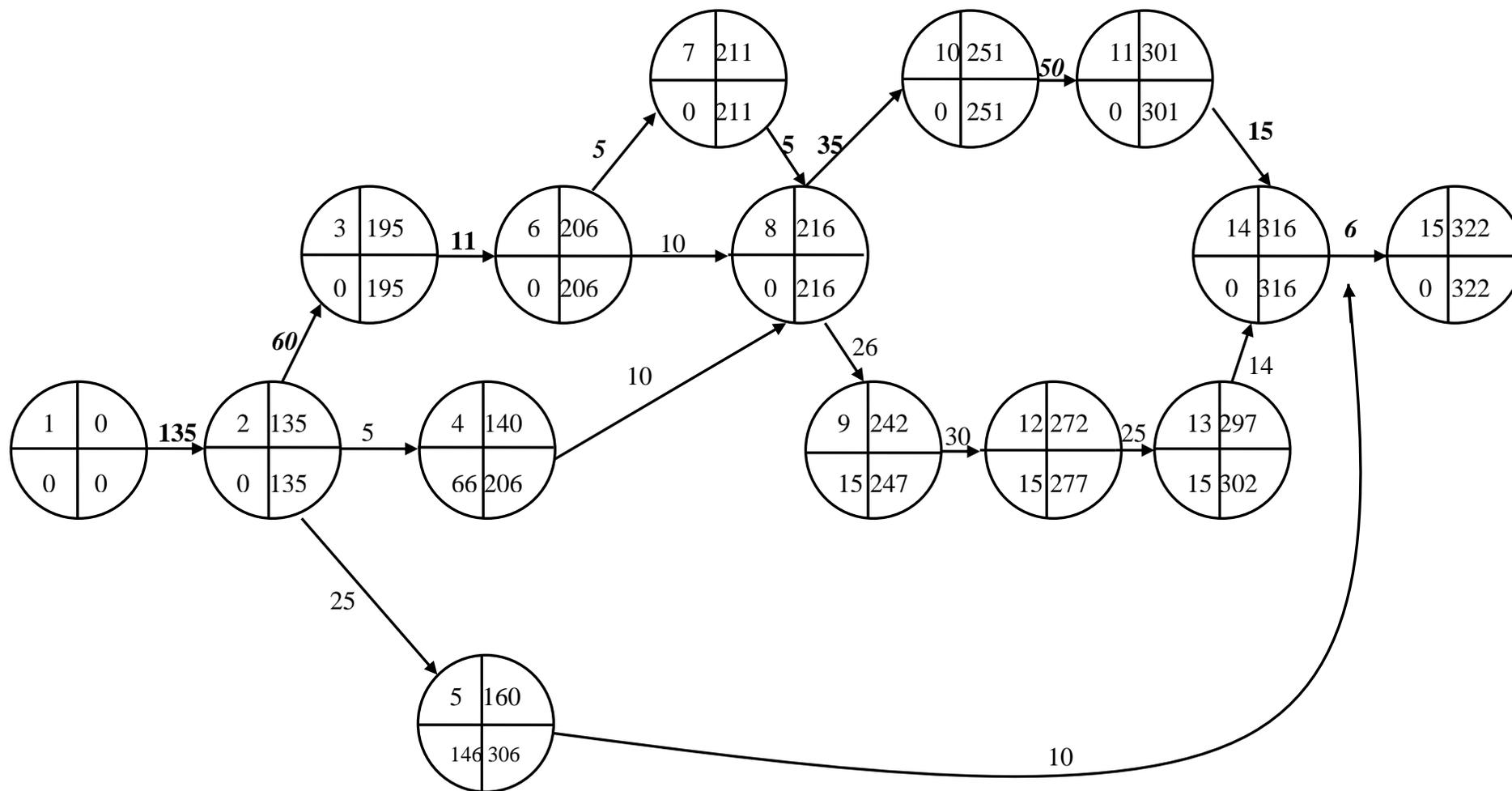


Сетевая модель после третьего шага оптимизации

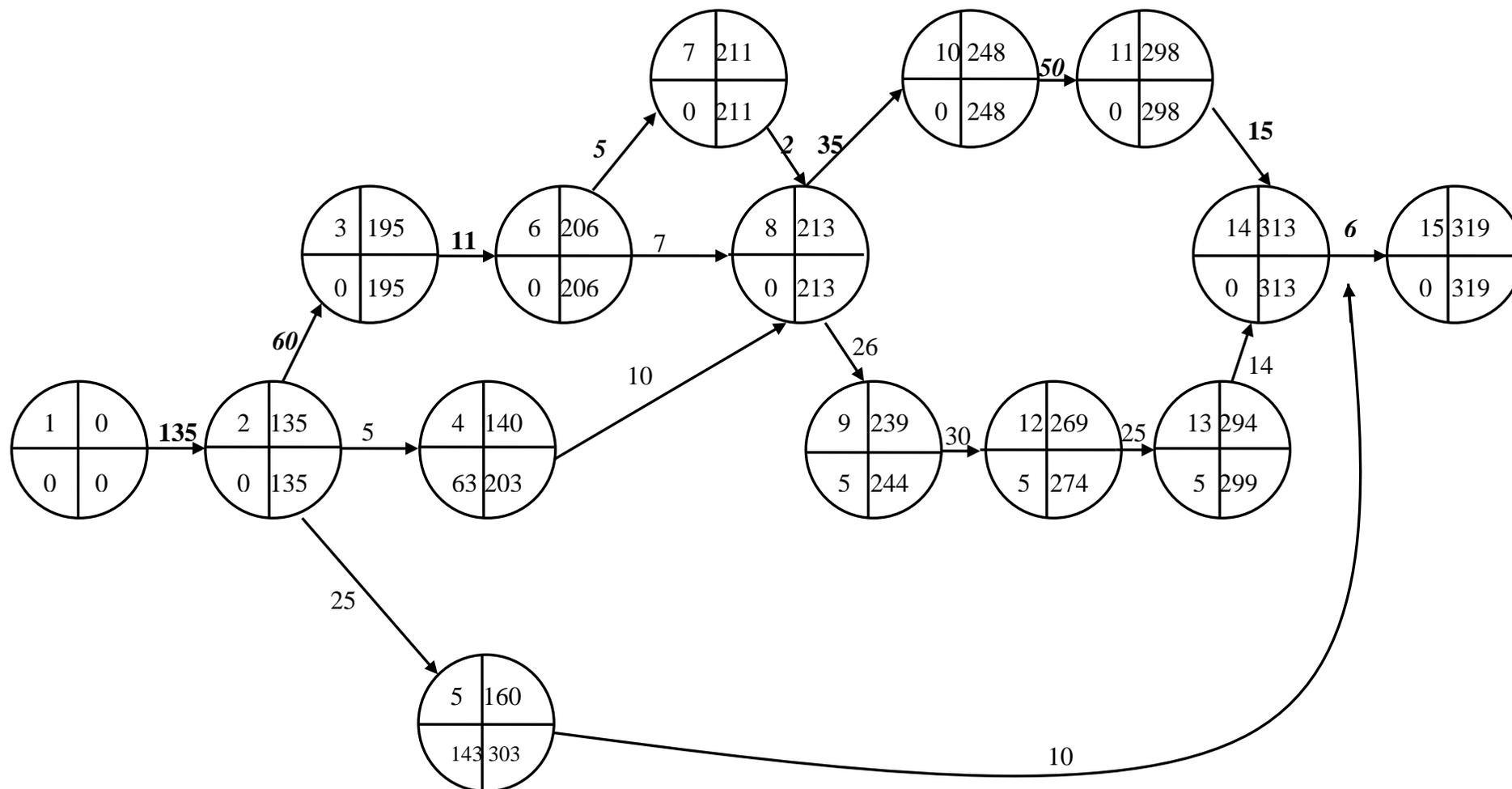


Сетевая модель после четвертого шага оптимизации

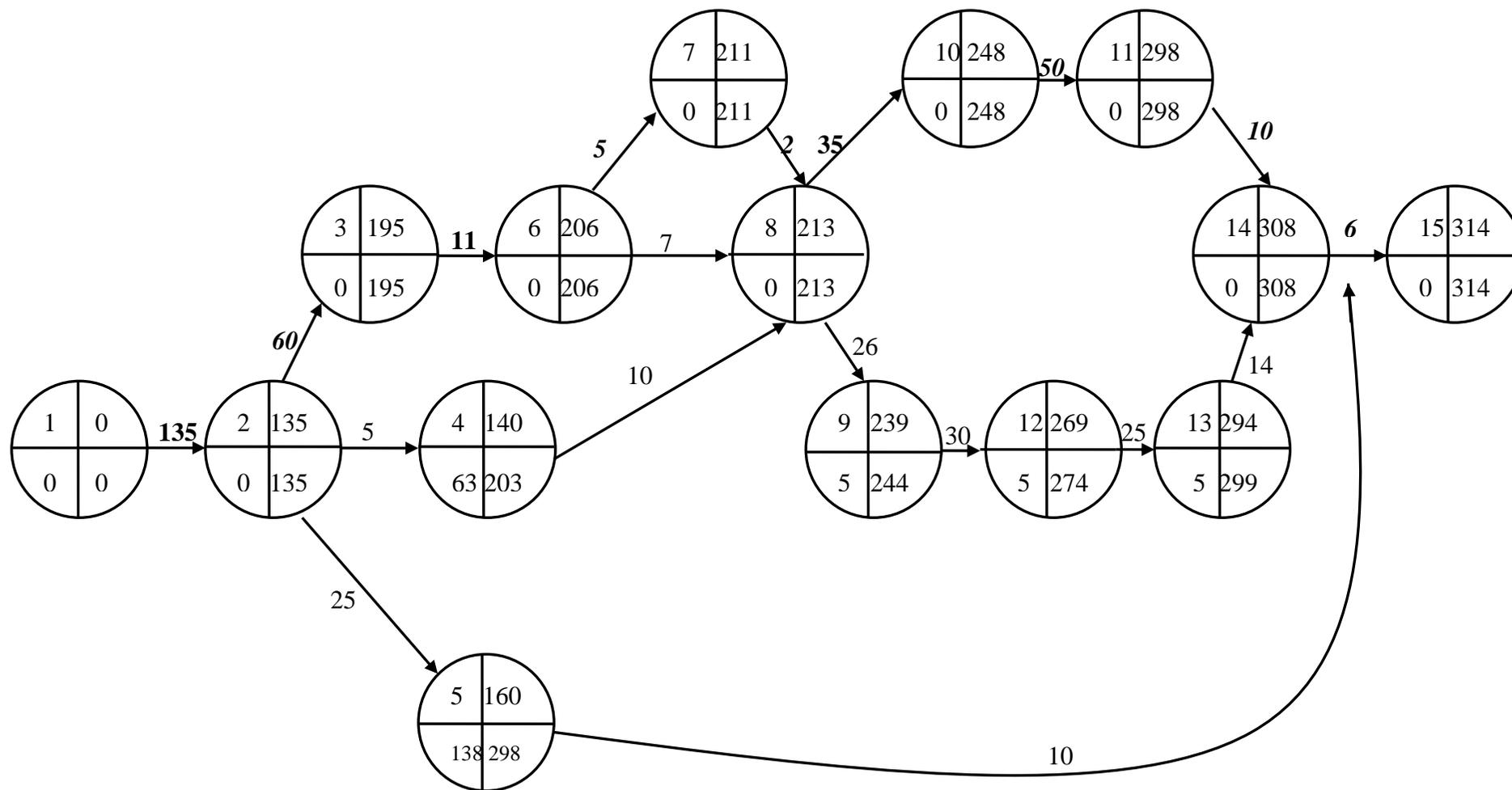




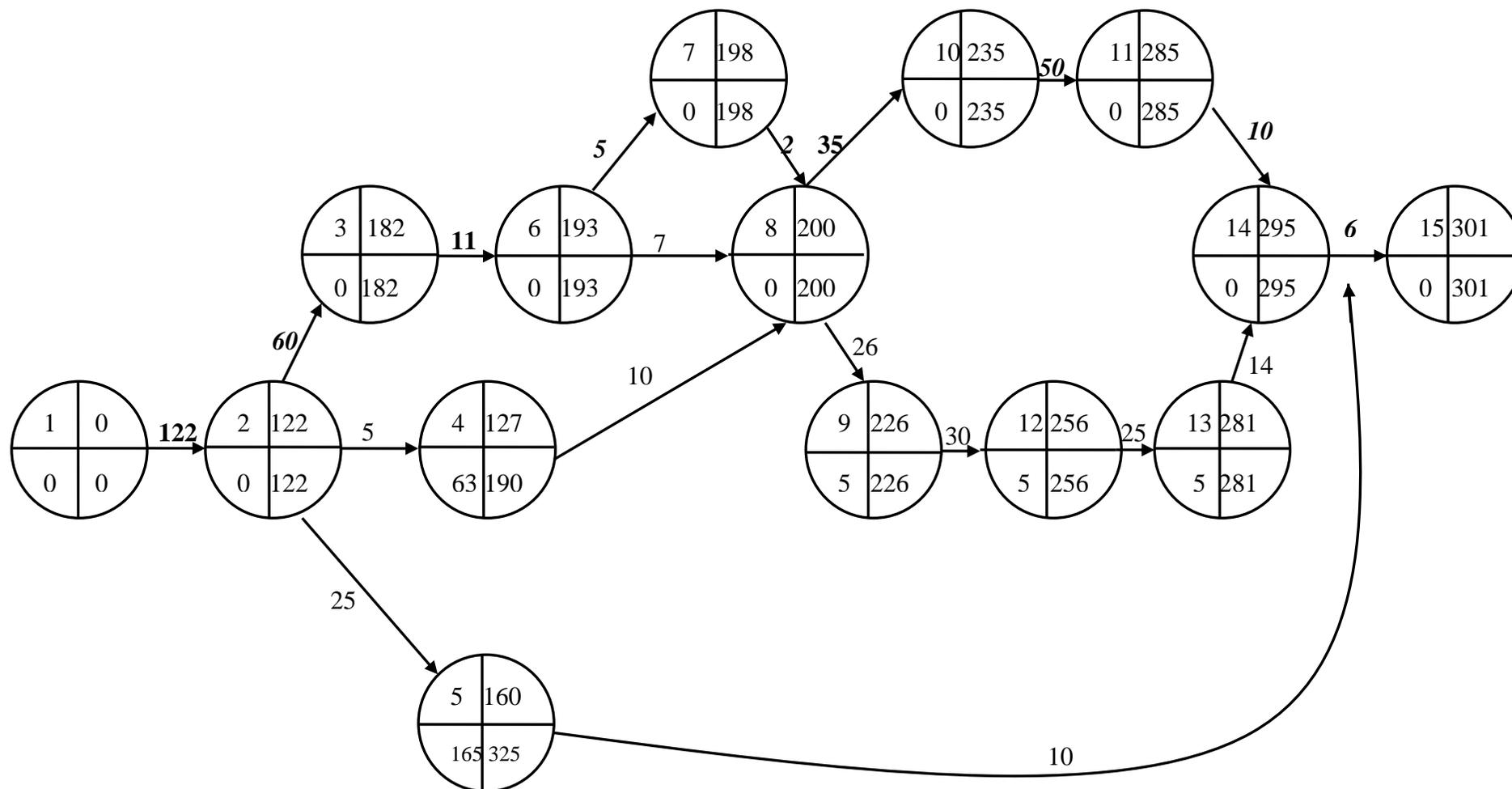
Сетевая модель после шестого шага оптимизации



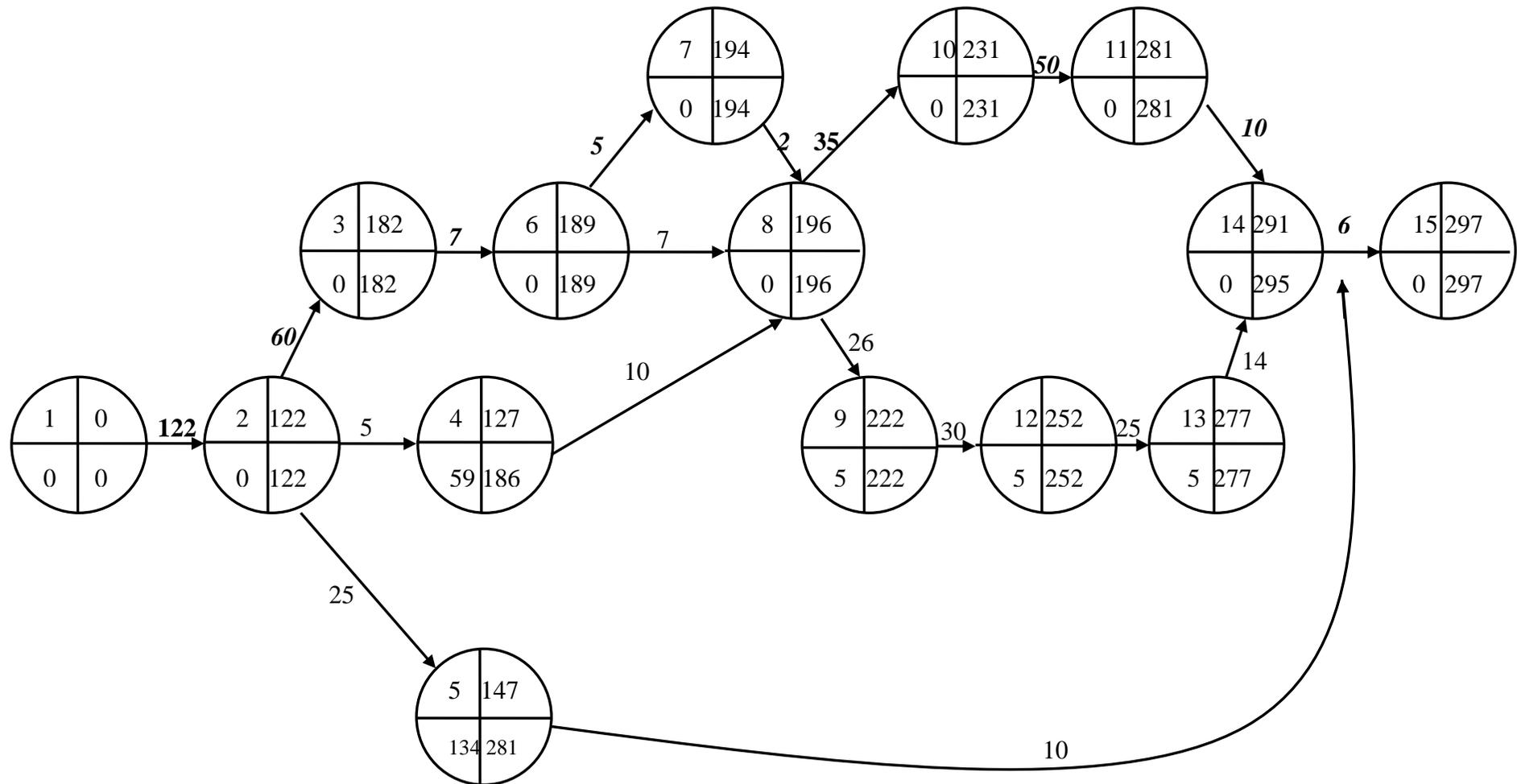
Сетевая модель после седьмого шага оптимизации



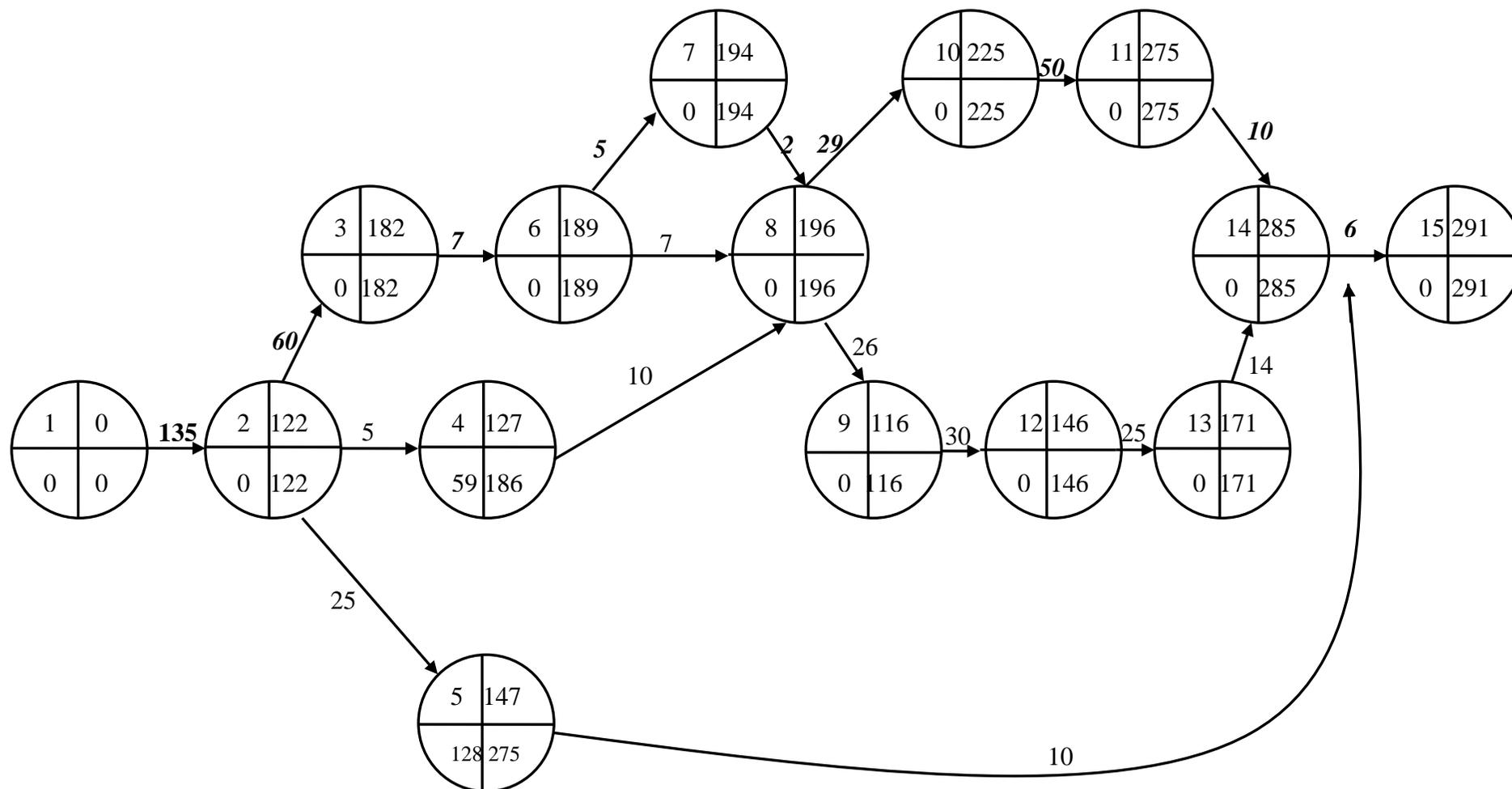
Сетевая модель после восьмого шага оптимизации



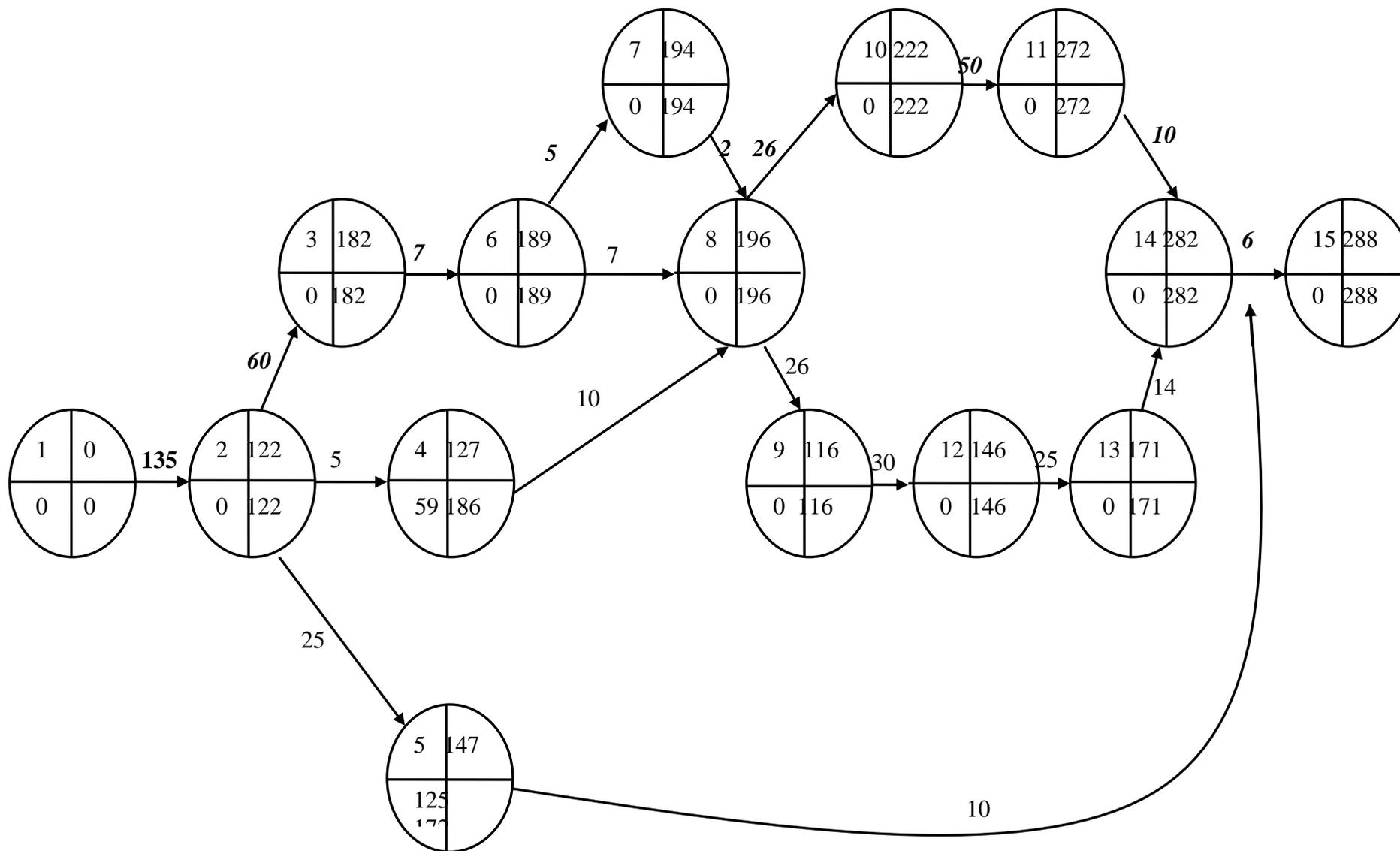
Сетевая модель после девятого шага оптимизации



Сетевая модель после десятого шага оптимизации



Сетевая модель после одиннадцатого шага оптимизации



ПРОГРАММА

```

#####
####  Модуль SR.pas
// ### Содержит описание и реализацию классов событий и работ
// ### Функции, обеспечивающие работу с моделью
#####
unit SR;
interface
//*****
// описание констант
//*****

const ALL_OK          = -99100; // нормально отработано
      ERR_WRONG__DIRECT = -99101; // неверное направление работы
      ERR__ALREADYH2XIST = -99102; // работа с таким кодом уже существует
      ERR_NOT_FOUND    = -99103; // работа с таким кодом не найдена
      ERR_WRONG_RANGE  = -99104; // неверный диапазон значений кодов
      событий

      maxSobytiy      =
      100;
      maxCVBN         =
      100;
      maxJOBS         =100;
      maxPATHS        = 100; maxJOBSinPATH  = 100;
//*****
// описание внешних процедур
//*****

procedure InitVars;

```



```

type
T_NM_Rabota = class
public
    // параметры работы (конструктивные)
    idxStart : integer; // начало работы
    idxEnd   : integer; // конец работы
    Dlit    : integer; // длительность работы (НОРМАЛЬНАЯ)
    T_y     : integer; // длительность работы (УСКОРЕННАЯ)
    C_n, C_y : integer; // стоимости нормальная и повышенная
    kf      : double; // коэффициент нарастания затрат

    tt     : integer; // длительность работы на текущий момент
    zt     : integer; // Макс.возмож.запас времени для сокращения работы на текущий
МОМЕНТ
    dt     : integer; // delta t (маленькая) = min[z; dTb]
    // временные параметры работы
    T_rn   : integer; // ранний срок начала работы
    T_ro   : integer; // ранний срок окончания работы
    T_pn   : integer; // поздний срок начала работы
    T_po   : integer; // поздний срок окончания работы
    R_p    : integer; // полный резерв
    R_c    : integer; // свободный резерв
    // методы
    procedure ClearParam;           // очистка Неконструктивных параметров работы
end;
//*****
// Описание глобальных переменных
//*****
var
    globKolvoSobytiy : integer;
    globKolvoRabot   : integer;

```



```

begin
  arrRabota[i] :=
  T_NM_Rabota.Create; with
  arrRabota[i] do
    begin idxStart:=0; idxEnd:=0; Dlit:=0; T__y:=0; C_n:=0; C_y:=0; kf:=0; zt:=0; end;
  end;
end;

//*****
// добавление элементов в массив работ
// knR - код начала работы, kkR - код конца работы,
// dlitR - длительность работы нормальная
// dlitU - длительность работы ускоренная
// stoimN,stoimP - стоимости нормальная и повышенная
//*****
function AddJob(knR,kkR,dlitR, dlitU,stoimN,stoimP:integer):integer;
var i,j:integer;
flg:boolean;
begin
  // проверка на валидность диапазона значений
  if (knR>=maxSobytiy) or (knR<1) or
    (kkR>=maxSobytiy) or (kkR<1) or
    (dlitR<0) or (dlitU<0) or
    (stoimN<0) or (stoimP<0) then
    begin
      Result := ERR_WRONG_RANGE;
      Exit;
    end;
  // проверка на валидность направления работы (начало <= конец)
  if (kkR<=knR) then begin Result := ERR_WRONG_DIRECT; Exit; end;
  // проверка на повторения
  flg := false;
  for i:=1 to globKolvoRabot do

```

```

    if (arrRabota[i].idxStart = knR) and (arrRabota[i].idxEnd = kkR) then
        begin fig := true; break; end;
if (fig = true) then begin Result := ERR_ALREADY_EXIST; Exit; end;
// в случае, если проверки пройдены успешно, то заносим в массив новую
работу Inc(globKolvoRabot);
arrRabota[globKolvoRabot].idxStart := knR;
arrRabota[globKolvoRabot].idxEnd :=
kkR; arrRabota[globKolvoRabot].Dlit :=
dлитR; arrRabota[globKolvoRabot].tt :=
dлитR;

arrRabota[globKolvoRabot].T_y := dлитU;
arrRabota[globKolvoRabot].C_n := stoimN;
arrRabota[globKolvoRabot].C_y := stoimP;

// параллельно заносим информацию в массив
событий i:=arrRabota[globKolvoRabot].idxStart; //
начало работы j :=arrRabota[globKolvoRabot].idxEnd;
// конец работы
arrSobytie[i].Nom := i; // прописываем номер
Inc(arrSobytie[i].cntOutbox); // добавляем исходящую ветку
arrSobytie[i].arrOutbox[arrSobytie[i].cntOutbox] :=j;
arrSobytie[j].Nom := j; // прописываем номер
Inc(arrSobytie[j].cntInbox); // добавляем входящую ветку
arrSobytie[j].arrInbox[arrSobytie[j].cntInbox]:=i
; Result := ALL_OK;
end;
//*****
// функция возвращает длительность работы

// по заданным кодам работы
//*****
function GetDlitJobN(knR,kkR : integer): integer;

```

```

var i:integer;
begin
  for i:=1 to globKolvoRabot do
    if (arrRabota[i].idxStart = knR) and (arrRabota[i].idxEnd = kkR) then
      begin Result :=arrRabota[i].tt; Exit; end;
      //      begin Result := arrRabota[i].Dlit; Exit; end;
    Result :=
ERR_NOT_FOUND; end;
//*****
// функция корректирует длительность работы
// по заданным кодам работы
//*****
function SetDlitJobTek(knR,kkR, newValue : integer): integer;
var i: integer;
begin
  for i:=1 to globKolvoRabot do
    if (arrRabota[i].idxStart = knR) and (arrRabota[i].idxEnd = kkR) then
      begin arrRabota[i].tt := newValue; Result := ALL_OK; Exit; end;
    Result := ERR_NOT_FOUND;
  end;
//*****
// расчет элементов сетевой модели  "*****"
//*****
procedure CalculateNet;
var i,j,tmp:integer;
    k: array[1..maxCVBN] of
integer; begin
  // Рассчитываем у событий T_ranee
  arrSobytie[1].T_ranee := 0; // первому событию делаем T_ranee = 0
  for i:=1 to globKolvoSobytyi do // цикл по событиям
    begin
      if arrSobytie[i].cntInbox = 0 then continue; // если входящих связей нету - то
      пролетаем

```

МИМО

```
if arrSobytie[i].cntInbox = 1 then // если входящая связь одна
begin
k[1] :=
arrSobytie[arrSobytie[i].arrInbox[1]].T__rannee
+
GetDlitJobN(arrSobytie[i].arrInbox[
1 ],i);
arrSobytie[i].T_rannee := k[1];
];
continue;
end;
if arrSobytie[i].cntInbox >= 2 then // если входящих связей больше равно 2
begin
for j:=1 to arrSobytie[i].cntInbox do k[j] :=
arrSobytie[arrSobytie[i].arrInbox[j]].T_rannee + GetDlitJobN(arrSobytie[i].arrInbox[j]
,i);
tmp:=k[1]; for j:=1 to arrSobytie[i].cntInbox do if k[j] > tmp then
tmp:=k[j]; arrSobytie[i].T_rannee := tmp;
continue;
end;
end;
// Рассчитываем у событий T_posdnee
arrSobytie[globKolvoSobytyi].T_posdnee :=
arrSobytie[globKolvoSobytyi].T_rannee; // последнему событию делаем
T_posdnee = T_rannee
for i:=globKolvoSobytyi downto 1 do // цикл по событиям обратно
begin
if arrSobytie[i].cntOutbox = 0 then continue; // если исходящих связей
нет - то пролетаем мимо
if arrSobytie[i].cntOutbox = 1 then // если исходящая
связь одна begin
k[1] := arrSobytie[arrSobytie[i].arrOutbox[1]].T__posdnee -
```

```

    GetDlitJobN(i,arrSobytie[i].arrOutbox[ 1 ]);
arrSobytie[i].T_posdnee := k[1];
continue;
end;
if arrSobytie[i].cntOutbox >= 2 then // если исходящих связей больше равно 2
begin
    for j:=1 to arrSobytie[i].cntOutbox do k[j] :=
arrSobytie[arrSobytie[i].arrOutbox[j]].T_posdnee - GetDlitJobN(i,arrSobytie[i].arrOutbox[j]);
    tmp:=k[1]; for j:=1 to arrSobytie[i].cntOutbox do if k[j] < tmp then tmp:=k[j];
    arrSobytie[i].T_posdnee := tmp;
continue;
end;
end;
// Рассчитываем у событий Reserv
for i:=1 to globKolvoSobytiy do // цикл по событиям
    arrSobytie[i].Rezerv := arrSobytie[i].T_posdnee - arrSobytie[i].T_ranee;
end;
//*****
// РАСЧЕТ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТ
//*****
procedure CalculateJobTimeParam;
var i:integer;
begin
    for i:=1 to globKolvoRabot do
    begin
        arrRabota[i].T_rn := arrSobytie[arrRabota[i].idxStart].T_ranee;
        arrRabota[i].T_pn := arrSobytie[arrRabota[i].idxEnd].T_posdnee - arrRabota[i].Dlit;
        arrRabota[i].T_ro := arrSobytie[arrRabota[i].idxStart].T_ranee + arrRabota[i].Dlit;
        arrRabota[i].T_po := arrSobytie[arrRabota[i].idxEnd].T_posdnee;
        arrRabota[i].R_p := arrSobytie[arrRabota[i].idxEnd].T_posdnee -
arrSobytie[arrRabota[i].idxStart].T_ranee - arrRabota[i].Dlit;
        arrRabota[i].R_c := arrSobytie[arrRabota[i].idxEnd].T_ranee -
arrSobytie[arrRabota[i].idxStart].T_ranee - arrRabota[i].Dlit;
    end; end;

```



```

// add to Path
    Inc(Paths[cntPath][0]); Paths[cntPath][Paths[cntPath][0]] := 1;
    end;
// определяем индекс элемента массива работ
1:=0; for k:=1 to globKolvoRabot do
if (arrRabota[k].idxStart = arrSobytie[curSob].Nom)
and
    (arrRabota[k].idxEnd = arrSobytie[curSob].arrOutbox[1]) then begin 1:=k; break; end;
    // add to Path
    Inc(Paths[curPath][0]); Paths[curPath][Paths[curPath][0]] := 1;

    curSob := arrSobytie[curSob].arrOutbox[1];
end;
Inc(curPath); if curPath > cntPath then break;
curSob := arrRabota[Paths[curPath][Paths[curPath][0]]].idxEnd;
end;
KolvoPaths := cntPath;
// считаем длины путей
for i:=1 to KolvoPaths do
forj:=1 to Paths[i][0]do
    Paths[i][(maxJOBSinPATH+1)]:=Paths[i][(maxJOBSinPATH+1)] +
arrRabota[Paths[i][j]].tt; //Paths[i][(maxJOBSinPATH+1)]:= Paths[i][(maxJOBSinPATH+1)]
+ arrRabota[Paths[i][j]].Dlit;
end;
//*****
// оптимизация по критерию "время-затраты"
//*****
procedure
OptimizationTimeExpenseses; var
i,j,k,l,m,n,o: integer;
nbbv: double;
dTb : integer; // дельта Т(большая) = Ткр-Тп
arrPaf : array [1..(maxPATHS+1), 1..2] of integer; // 1-ном, 2-длина

```

```

kolObRab : integer; // кол-во общих работ
arrObRab : array [1..maxJOBSinPATH,1..2] of integer; // 1стлб=ном.работы,
2стлб.=KF
summZtrtOb: integer; // суммарные затраты для сокращаемой общей работы
summZtrtRz: integer; // суммарные затраты для сокращаемых разных работ
Udor      : integer; // удорожание на данном этапе сокращения
kolRzRab  : integer; // кол-во уникальных работ
arrRzRab  : array [1..(maxPATHS+1), 1..2] of integer; // ном работы, KF
arrTmp    : array [ 1. .(maxPATHS+1)] of integer;
kolvoKrit: integer; // колво критических путей
dlitKr    : integer; // длительность критического пути
idxPodKr  : integer; // индекс подкритического пути
dlitPodKr : integer; // длительность подкритического пути
// массив для третьего варианта... (см.ниже)
arr3VRab  : array [1..maxPATHS, 1..maxJOBSinPATH] of integer; // ном работы
Rpath     : array [1 ..777] of set of byte;
SummZRpath : array [1..777 ,1..2] of integer; // стлб1=ном.сета стлб2=сумм.затрат
cntRpath  : integer;
V3_kolvopath: integer;
V3_level: integer;
V3_curpath: integer;
V3_kolvo_vetvey: integer;
begin
  // рассчитываем общие затраты на проект перед оптимизацией
  C_pr_BeforeOptim := 0; for i:=1 to globKolvoRabot do C_pr-BeforeOptim
:= C__pr_BeforeOptim + arrRabota[i] .C_n;
  C_pr:=C_pr_BeforeOptim; T_norm :=0;
  m:=m;
while true
do begin
  // шагаем по всем работам и считаем коэффициенты нарастания затрат и запасы
времени на текущий момент
  for i:=1 to globKolvoRabot do

```

```

begin
arrRabota[i].zt := arrRabota[i].tt - arrRabota[i].T_y;
arrRabota[i].kf := (arrRabota[i].C_y - arrRabota[i].C_n)/(arrRabota[i].Dlit -
arrRabota[i].T_y);
end;
// _____

// расчет критических и подкритических путей
// _____

// обнуляем сначала а потом заносим длины путей и их номера в массив для сортировки

for i:=1 to (maxPATHS+1) do begin arrPaf[i][1]:=0; arrPaf[i][2]:=0; end;
for i:=1 to KolvoPaths do begin arrPaf[i][1]:=i;
arrPaf[i][2]:=Paths[i][(maxJOBSinPATH+1)];en
d; // сортируем
for i:=1 to KolvoPaths do for j:=2 to KolvoPaths do
if arrPaf[j][2] > arrPaf[j-1][2] then
begin
arrPaf[(maxPATHS+1)][1] := arrPaf[j-1][1]; arrPaf[(maxPATHS+1)][2] := arrPaf[j-1][2];
arrPaf[j-1][1]:= arrPaf[j][1]; arrPaf[j-1][2] := arrPaf[j][2];
arrPaf[j][1] :=arrPaf[(maxPATHS+1)][1];arrPaf[j][2] := arrPaf[(maxPATHS+1)][2]; end;
// ищем кол-во критических путей
kolvoKrit := 1; for i:=2 to KolvoPaths do if arrPaf[i][2] = arrPaf[1][2] then Inc(kolvoKrit)
else break;
if (kolvoKrit+1)>KolvoPaths then Exit; // ОПТИМИЗАЦИЯ закончена, т.к. кол-
во критич.путей = колву путей вообще
// если все нормально, то определяем подкритический путь и его длину
idxPodKr:=kolvoKrit+1; dlitPodKr:=arrPaf[idxPodKr][2];
dlitKr := arrPaf[1][2]; // определяем длину критического пути
if T_norm = 0 then T_norm := dlitKr; // заносим длительность проекта
перед оптимизацией
// теперь имеем, что в массиве arrPaf есть от 1 до kolvoKrit в кол-ве kolvoKrit стока
критических путей
//050505 - тут надо сделать проверку на дельта T больше нуля, иначе не имеет
смысла дальнейшая оптимизация, т.к. отсутствовать будут критические пути

```

```

dTb := dlitKr - dlitPodKr; // ищем дельта T большую
for i:=1 to kolvoKrit do
begin
  k:=arrPaf[i][1]; n:=0;
  forj:=1 toPaths[k][0]do
    if arrRabota[Paths[k][j]].zt > 0 then Inc(n);
  if n=0 then break; // т.е. в каком-то критич.пути не нашлось запасов времени вообще,
  значит оптимизацию заканчиваем
end;
if n=0 then
  break; // т.е. в каком-то критич.пути не нашлось запасов времени вообще, значит
  оптимизацию заканчиваем
// рассмотрим теперь два случая... 1) когда Крит.путь один, и 2) когда крит.путей
  больше одного
  ////////////////////////////////////////////////////////////////////
  //1) когда Крит.путь один,
  ////////////////////////////////////////////////////////////////////
  if(kolvoKrit= 1) then
  begin
    L_kr := arrPaf[1][1];
    // найдем работу с минимальным KF и ненулевым Zt
    nbbv:= arrRabota[ Paths[L_kr][1] ].kf; j:=1;
    for i:=1 to Paths[L_kr][0] do
      if (arrRabota[ Paths[L_kr][i] ].kf < nbbv) and (arrRabota[ Paths[L_kr][i] ].zt<> 0)
        then begin nbbv:= arrRabota[ Paths[L_kr][i] ].kf; j:=i; end;
    // ищем дельта t маленькая
    arrRabota[ Paths[L_kr][j] ].dt := Min (arrRabota[ Paths[L_kr][j] ].zt, dTb);
    // сокращаем работу на величину дельта t маленькая
    SetDlitJobTek(
      arrRabota[ Paths[L_kr] [j] ]
      .idxStart, arrRabota[ Paths[L_kr][j]
      ].idxEnd,

```

```

arrRabota[ Paths[L_kr][j] ].tt - arrRabota[ Paths[L_kr][j]
].dt); // ищем удорожание проекта на этой работе
Udor := Round(arrRabota[ Paths[L_kr][j] ].kf) * arrRabota[ Paths[L_kr][j] ].dt;
end;
////////////////////
//2) когда Крит.путей несколько,
////////////////////
if(kolvoKrit > 1) then
begin
//=====
//===== ищем одинаковые работы в критических путях
//=====

summZtrtOb:=0; kolObRab := 0;
for i:=1 to maxJOBSinPATH do begin arrObRab[i][1]:=0;arrObRab[i][2]:=0;end;
L_kr:=arrPaf[1][1];
for i:=1 to Paths[L_kr][0]
do begin
j:=Paths[L_kr][i]; // берем для проверки работу
// цикл по остальным критическим путям
m:=1; // кол-во общих работ
for k:=2 to kolvoKrit do
begin
l:=arrPaf[k][1];
for n:=1 to Paths[1][0] do if Paths[1][n] = j then Inc(m);
end;
if (m=kolvoKrit) and (arrRabota[j].zt <> 0) then // значит работа - общая для всех
критических путей, и имеет ненулевой запас времени
begin
Inc(kolObRab); // увеличиваем кол-во общих работ
arrObRab[kolObRab][1]:=j;
arrObRab[kolObRab][2] :=Round(arrRabota[j].kf);
end;
end;
end;

```

```

// теперь мы получили список общих работ критических путей, возможно
подлежащие сокращению, а теперь отсортируем полученный массив на убывание по
коэффициенту нарастания затрат
for i:=1 to kolObRab do for j:=2 to kolObRab
do if arrObRab[j][2] < arrObRab[j-1][2] then
begin
arrObRab[maxPATHS][1] :=arrObRab[j-1][1];
arrObRab[maxPATHS][2] := arrObRab[j-1][2];
arrObRab[j-1][1] :=arrObRab[j][1];
arrObRab[j-1][2] := arrObRab[j][2];
arrObRab[j][1] :=arrObRab[maxPATHS][1];
arrObRab[j][2] :=arrObRab[maxPATHS][2];
end;
summZtrtOb:=arrObRab[1][2];
// теперь мы в arrObRab[1][...] имеем общую для критических путей работу, готовую
для сокращения, т.к. имеющую наименьший KF (коэффициент нарастания затрат)
// суммарные затраты в этом случае равны arrObRab[1][2] = summZtrtOb
//=====
// ===== ищем уникальные работы в каждом критическом пути
//=====
summZtrtRz:=0; kolRzRab := 0;
for i:=1 to (maxJOBSinPATH+1) do begin arrRzRab[i][1]:=0;arrRzRab[i][2]:=0;end;
for o:=1 to kolvoKrit do
begin
L_kr:=arrPaf[o][1];
for i:=1 to Paths[L_kr][0]
do begin
j :=Paths[L_kr] [i]; // берем для проверки работу
m:=0; // будто бы она еще пока в других путях не найдена
for k:=1 to kolvoKrit do // цикл по остальным критическим путям
begin
if k=o then continue;
l:=airPaf[k][1];

```

```

    for n:=1 to Paths[1][0] do if Paths[1][n] = j then Inc(m);
    end;
if (m=0) and (arrRabota[j].zt<>0) then // значит работа - уникальная для всех
критических путей, и имеет ненулевой запас времени
begin
    if (arrRzRab[o][1]=0)
    then begin
        arrRzRab[o][1]:=j;
        arrRzRab[o][2]:=Round(arrRabota[j].kf);
        Inc(kolRzRab); end
    else
        if (arrRzRab[o][1]<>0) and (arrRzRab[o][2] > Round(arrRabota[j].kf)) then
        begin
            arrRzRab[o][1]:=j;
            arrRzRab[o][2]:=Round(arrRabota[j].kf);
            end;
        end;
    end;
end; // i
end; //o
summZtrtRz:=0;
for i:=1 to kolvoKrit do summZtrtRz := summZtrtRz + arrRzRab[i][2];
// теперь мы в arrRzRab имеем разные для критических путей работы, готовые
// для сокращения, имеющие наименьший коэффициент нарастания затрат и ненулевой
запас времени
// суммарные затраты в этом случае равны summZtrtRz
//=====
// теперь занимаемся сокращением работ, в зависимости от того что выгодно
//=====
//=== 3 вариант (ничто, что стоит первым) :-)
// в случае если нечего сокращать по общим работам, ...И... уникальные работы есть
не в каждом критич. пути
// Иначе, если кол-во уникальных работ критических путей, не равно их кол-ву, или
// кол-во общих работ = нулю.

```

```

// Тут тогда применяем вариант , когда ищем в каждом критическом пути
работу наиболее
// выгодную для сокращения
if ((kolObRab=0) and (kolRzRab <> kolvoKrit)) then
begin
// заносим в массив arr3VRab работы, возможно подлежащий к сокращению
for i:=1 to maxPATHS do for j:=1 to maxJOBSinPATH do arr3VRab[i][j]:=0;
for o:=1 to kolvoKrit do
begin
L_kr:=arrPaf[o][1];
for i:=1 to Paths[L_kr][0]
do begin
j:=Paths[L_kr][i]; // берем для проверки
работу
if (arrRabota[j].zt<>0) then
begin
Inc(arr3 VRab[o] [maxJOBSinPATH]);
arr3VRab[o] [arr3VRab[o] [maxJOBSinPATH]] := j;
end
end; //i
end; //o
//изначально задаем пути от которых будем шагать, т.е. т первого уровня
for i:=1 to 777 do Rpath[i] := [];
for i:=1 to arr3VRab[1][maxJOBSinPATH] do Rpath[i] := Rpath[i] + [arr3VRab[1][i]];
V3_level:=2;
V3_kolvopath:=arr3VRab[1][maxJOBSinPATH];
// загоняем все в массив сетов, все варианты, комбинации работ
while V3_level <= kolvoKrit do
begin
for i:=1 to V3_kolvopath do
begin
V3_curpath:=i;
V3_kolvo_vetvey:=arr3VRab[V3_level][maxJOBSinPATH];

```

```

if V3_kolvo_vetvey>1 then
begin
  for j :=2 to V3_kolvo_vetvey do
  begin
    Inc(V3_kolvopath);
    Rpath[V3_kolvopath] :=Rpath[V3_curpath];
    Rpath[V3_kolvopath]:=Rpath[V3_kolvopath] + [arr3VRab[V3_level][j]];
  end;
  Rpath[V3_curpath]:=Rpath[V3_curpath] + [arr3VRab[V3_level][1]]; end
else
  Rpath[V3_curpath]:=Rpath[V3_curpath] + [arr3VRab[V3 Jevel][1]];
end;//for
  Inc(V3_level);
  end;//while
// чистим массив суммарных затрат на сети
for i:=1 to 777 do begin SummZRpath[i][1]:=0; SummZRpath[i][2]:=0; end;
// цикл по сетам просчитаем суммарные стоимости каждого сета
for i:=1 to V3_kolvoPath do
  for j:=1 to globKolvoRabot do
  begin
    SummZRpath[i][1]:=i;
    if j in Rpath[i] then begin SummZRpath[i][2]:=SummZRpath[i][2]
+ Round(arrRabota[j].kf); end;
    end;
    // ищем сет с минимальными затратами
    m:=1; n:=SummZRpath[m][2];
    for i:=1 to V3_kolvoPath do if SummZRpath[i][2] < n then begin m:=i;
n:=SummZRpath[i][2]; end;
    // теперь имеем в переменной М - номер сета с минимальными
затратами, содержащий работы для сокращения
    // а в переменной N - сумма затрат на сокращение работ хранящихся в сете
    // производим сокращение работ
    for i:=1 to (maxPATHS+1) do arrTmp[i]:=0;

```

```

// определим минимальное, на что сокращать надо , в переменную
К arrTmp[1] :=dTb;j:=1;
for i:=1 to globKolvoRabot do if i in Rpathjm] then begin Inc(j);
arrTmp[j]:=arrRabota[i].zt; end;
k:=arrTmp[1];
for i:=1 to j do if arrTmp[i] < k then k:=arrTmp[i];
// сократим каждую работу на величину К
Udor:=0; for i:=1 to globKolvoRabot do
if i in Rpath[m] then
begin
arrRabota[i].dt := k; // ищем дельта t маленькая
// сокращаем работу на величину дельта t маленькая
SetDlitJobTek(
arrRabota[i] .idxStart,
arrRabota[i] .idxEnd,
arrRabota[i].tt - arrRabota[i].dt);
// ищем удорожание проекта на этой работе
Udor := Udor + Round(arrRabota[i].kf) *
arrRabota[i].dt; end;
m:=m;
end // на if
else
//+++++
+++++
// в случае если сумма затрат на сокращение одинаковых работ меньше равно чем
разных
if(
((summZtrtOb <= summZtrtRz) and (kolObRab>0)) // когда подходит вариант для
сокр.общ.рб.
or
((summZtrtRz < summZtrtOb) and (kolRzRab <> kolvoKrit)) // когда НЕ подходит
вариант для сокр.раз.рб.

```

```

)the
n
begin
  o:=arrObRab[1][1];
  // ищем дельта t маленькая
  arrRabota[o].dt := Min(arrRabota[o].zt, dTb);
  // сокращаем работу на величину дельта t
  маленькая SetDlitJobTek(
  arrRabota[o].idxStart,
  arrRabota[o].idxEnd,
  arrRabota[o].tt - arrRabota[o].dt);
  // ищем удорожание проекта на этой работе
  Udor := Round(arrRabota[o].kf * arrRabota[o].dt);
end

else
  //+++++
  // в случае если сумма затрат на сокращение разных работ меньше чем одинаковых
  if(
    ((summZtrtRz < summZtrtOb) and (kolRzRab = kolvoKrit)) // когда подходит вариант
для сокр.раз.рб.
    or
    ((summZtrtOb <= summZtrtRz) and (kolObRab=0)) // когда НЕ подходит вариант для
сокр.общ.рб.
  )the
n
begin
  for i:=1 to (maxPATHS+1) do arrTmp[i]:=0;
  arrTmp[1] := dTb;
  for i:=1 to kolvoKrit do
begin
o:=arrRzRab[i][1]; arrTmp[i+1] :=arrRabota[o].zt;
end;

```

```

// определим минимальное, на что сокращать
надо m:=arrTmp[1];
for i:=1 to (kolvoKrit+1) do if arrTmp[i] < m then m:=arrTmp[i];
// сократим каждую работу на величину M
Udor := 0; for i:=1 to kolvoKrit do
begin
o:=arrRzRab[i][1];
arrRabota[o].dt := m; // ищем дельта t маленькая
// сокращаем работу на величину дельта t маленькая
SetDlitJobTek(
arrRabota[o].idxStart,
arrRabota[o].idxEnd,
arrRabota[o].tt - arrRabota[o].dt);
// ищем удорожание проекта на этой работе
Udor := Udor + Round(arrRabota[o].kf) * arrRabota[o].dt;
end; end;
end;
// на условие когда Крит.путей несколько
// рассчитываем новые затраты на проект
C_pr := C_pr + Udor;
// перерасчитываем модель, параметры, и находим пути
CalculateNet; CalculateJobTimeParam; FindPaths;
m:=m;
end; // while
T_krit:=dlitKr;
end; // конец процедуры оптимизации
end.

```

ГЛОССАРИЙ

Альтернативный план (Fallback Plan) - план реализации альтернативного сценария действий, который может быть использован для преодоления возможных последствий свершения рискового события (включая заблаговременное выполнение работ, которые могут потребоваться для практической поддержки этого плана) сценария действий, который может быть использован для преодоления возможных последствий свершения рискового события (включая заблаговременное выполнение работ, которые могут потребоваться для практической поддержки этого плана).

Анализ заработанной стоимости (Earned Value Analysis) - анализ хода выполнения проекта, при котором фактические денежные средства, трудозатраты (или другие количественные показатели), предусмотренные в бюджете проекта и фактически израсходованные, сравниваются со стоимостью выполненных работ.

Анализ использования ресурсов (Resource Analysis) - процесс анализа и оптимизации использования ресурсов в проекте. При этом часто используются методы сглаживания и выравнивания (калибровка) потребления ресурсов.

Анализ критического пути (Critical Path Analysis) - процедура для расчета критического пути и резервов времени в сетевом графике.

Анализ методом Монте - Карло (Monte Carlo Analysis) - метод оценки риска календарного плана, при котором осуществляется многократная имитация выполнения проекта с целью определения

функции распределения вероятности получения возможных результатов.

Анализ мульти - проекта (Multi- Project Analysis) - анализ мульти - проекта проводится для изучения воздействия и взаимодействия ресурсов и работ, прогресс которых влияет как на выполнение группы проектов, так и на проекты, использующие одни и те же ресурсы, либо и то и другое вместе.

Анализ риска (Risk Analysis) - систематическое использование доступной информации для определения того, как часто могут совершаться определенные события, и количественной оценки их возможных последствий. (Метод, используемый для количественной оценки последствий неопределенности)

Анализ сетевого графика (Network Analysis) - метод, используемый для расчета критического пути проекта, ранних и поздних сроков выполнения практической поддержки этого плана)

Анализ сетевого графика (Network Analysis) - метод, используемый для расчета критического пути проекта, ранних и поздних сроков выполнения работ и резервов времени.

Анализ соотношения затрат и выгод (Cost Benefit Analysis) - анализ взаимосвязи между затратами на выполнение исходного и текущего задания по проекту и первоначально предусмотренных и текущих выгод, вытекающих из рассматриваемой ситуации.

Анализ сроков (Time Analysis) - процесс расчета ранних и поздних сроков для каждой работы проекта, основанный на продолжительности этих работ и логических связях между ними.

Базис (Baseline) - те уровни показателей, по отношению к которым ведется контроль и регулирование проекта. Например: фиксированные значения плановых показателей, первоначальный (утвержденный или базисный) план (для проекта, пакета работ или отдельной работы), плюс или минус согласованные (допустимые) отклонения.

Базисные затраты (Baseline Cost) - количество денежных средств, предполагавшихся для выполнения работы по разработанному базисному календарному плану.

Базисные сроки (Baseline Dates) - первоначально планировавшиеся сроки начала и окончания работ. Используются для сравнения с текущими плановыми сроками с целью выявления любых отклонений. Используются также для подсчета сметной стоимости запланированных работ при анализе заработанной стоимости.

Базисный календарный план (Baseline Schedule) - базисный календарный план является фиксированным календарным планом. Это стандарт, по отношению к которому производится количественная оценка выполнения проекта. Текущий календарный план сравнивается с базисным календарным планом, который остается замороженным до его пересоставления. Пересоставление базисного календарного плана производится при значительном изменении предметной области (содержания) проекта.

Базисный срок проекта (Project Base Date) - дата отсчета, используемая в качестве основы для начала календаря проекта.

Бюджет по завершению (Budget at Completion) - оценка общей стоимости проекта по его завершении.

Бюджет проекта (Project Budget) - сметная стоимость, распределенная по периодам выполнения проекта.

Взаимосвязанные работы (Tied Activities) - работы, имеющие логические связи, определяющие последовательность их выполнения и/или возможное совмещение.

Вторичный риск (Secondary Risk) - риск, который может возникнуть в результате осуществления плана реагирования на рискованные события проекта.

Выполнение плана проекта (Project Plan Execution) - реализация плана проекта путем выполнения включенных в него работ.

График (диаграмма) ПЕРТ (PERT Chart) - специальный тип сетевой модели (диаграммы) проекта. См. Метод просмотра и оценки программы.

График Гантта (Gantt Chart) - частная разновидность линейного графика, отображающая план работ во времени. График Гантта является поэтапным изображением продолжительности работ во времени. Работы и другие табличные данные помещаются с левой стороны, а продолжительности работ отображаются с помощью горизонтальных лент.

График отставания (Slip Chart) - графическое изображение прогнозируемых сроков окончания ключевых событий по сравнению с базисным календарным планом.

Дата позднего начала (Late Start Date - LS) - в методе критического пути самый поздний срок, когда может быть начата работа без задержки

установленных сроков свершения контрольных событий (обычно: даты окончания проекта).

Дата позднего окончания (Late Finish Date - LF) - в методе критического пути самый поздний срок, когда может быть завершена работа без задержки установленных сроков свершения контрольных событий (обычно: даты окончания проекта).

Дата Разделения данных (Data Date - DD) - изменяемая дата, которая отделяет фактические (исторические) данные от будущих (запланированных) данных. Называется также «текущая дата».

Дата раннего начала (Early Start Date - ES) - в методе критического пути наиболее ранний возможный срок, когда незавершенные части работы (или проекта) могут быть начаты, с учетом соблюдения логики сети и заданных ограничений календарного плана. Даты раннего начала могут изменяться по мере выполнения проекта и внесения изменений в план проекта.

Дата раннего окончания (Early Finish Date - EF) - в методе критического пути наиболее ранний возможный срок, когда незавершенные части работы (или проекта) могут быть завершены, с учетом соблюдения логики сети и других ограничений календарного плана. Даты раннего окончания могут изменяться по мере выполнения проекта и внесения изменений в план проекта.

Движение денежных средств (Cash Flow) - денежные поступления и платежи за определенный период.

Диаграмма Парето (Pareto Diagram) - гистограмма зависимости частоты наступления событий от их причин, которая показывает, сколько результатов было вызвано каждой из определенных причин.

Директивная дата завершения (Target Completion Date) - директивный срок завершения проекта или его части.

Директивная дата окончания (Target Finish Date) - дата, ограничивающая допустимые сроки окончания работ.

Директивная дата начала (Target Start Date) - директивный срок начала проекта или его части.

Директивный срок (Target Date) - срок выполнения работы или проекта, заданный заказчиком. Существуют два вида директивных сроков: директивные сроки начала и директивные сроки окончания

Документ определения работы (Statement of Work - SOW) - содержательное описание продуктов или услуг, производимых и/или поставляемых в соответствии с контрактом

Дополнительные работы (Workaround) - меры реагирования на негативное рисковое событие. Отличаются от планирования негативных затрат тем, что дополнительная работа не планируется заранее в ожидании наступления рискового события.

Допустимый календарный план (Feasible Schedule) - любой календарный план, удовлетворяющий принятым в проекте ограничениям (время, ресурсы, стоимость и другие).

Доступность ресурса (Resource Availability) - уровень наличных ресурсов, который может меняться во времени.

Дуга / Стрелка (Arrow) - графическое представление работы.
Метод

построения сетевых моделей (диаграммы): «Работы-дуги».

Жизненный цикл проекта (Project Life - Cycle) — набор последовательных фаз проекта, название и число которых

определяется потребностями контроля организации или организаций, вовлеченных в проект.

Завершающая работа (Finishing /End Activity) - последняя работа в проекте, которая должна быть выполнена для того, чтобы проект считался завершенным. Эта работа не имеет последующих работ.

Зависание (Dangle) — работа сетевого графика, которая не имеет либо последующей, либо предшествующей работы.

Закрытие проекта (Project Close Out) - завершение и закрытие проекта, включая разрешение всех спорных вопросов.

Запас (Reserve) - способ, применяемый для уменьшения стоимостных и/или временных рисков в плане проекта. Обычно используется в различных модификациях с целью предотвращения непредвиденных рисков.

Запас времени (Slack) - расчетный промежуток времени, в пределах которого должно свершиться событие с учетом логических и заданных ограничений сетевого графика, не оказывая влияния на общую продолжительность проекта. Он может быть отрицательным по отношению к заданному сроку.

Запланированная работа (Planned Activity) - работа в календарном плане проекта, которая в текущий момент времени еще не начата или не закончена.

Запланированные затраты (Planned Cost) - расчетные затраты, предусмотренные для достижения определенных результатов или целей проекта.

Иерархическая система сетевых моделей (Hierarchy of Networks) - иерархия сетевых моделей с разной степенью детализации от укрупненных до детальных уровней, с отображением связей между этими сетевыми моделями.

Идентификация риска (Risk Identification) - определение рисков событий, способных повлиять на выполнение проекта.

Изменение предметной области (Scope Change) — любые изменения, вносимые в предметную область проекта. Изменение предметной области обычно требует пересмотра стоимости и календарного плана проекта.

Индекс календарного плана (Schedule Performance Index - SPI) - отношение плановой стоимости выполненной работы к полной стоимости работы, запланированной к рассматриваемому моменту. Это коэффициент эффективности выполнения работ в сравнении с тем, что должно было быть сделано.

Индекс критичности выполнения (Critical Performance Indicator) -
отношение базисных показателей к фактическим показателям проекта, по которым могут быть оценены характеристики выполнения проекта.

Индекс стоимости выполненных работ (ИС) (Cost Performance Index - CPI) - отношение сметной стоимости к фактическим затратам. ИС часто используют для планирования величины возможного увеличения стоимости путем использования следующей формулы: первоначально определенные затраты/ИС = стоимость проекта по завершению. ИС

является мерой эффективности выполнения работ по затратам ресурсов.

Календарная единица (Calendar Unit) - наименьшая единица времени, используемая при календарном планировании проекта. Календарные единицы в основном определяются в часах, днях или неделях, но также могут быть представлены в сменах или даже в минутах. Преимущественно используются в программных продуктах управления проектами.

Календарное планирование (Scheduling) - процесс составления календарного плана работ в проекте. Включает; определение перечня работ проекта; их логические взаимосвязи; исполнителей и продолжительности работ; ресурсные, временные и внешние ограничения; и на их основе - сроки выполнения работ проекта.

Календарное планирование мульти - проекта (Multi - Project Scheduling) - процесс составления календарного плана работ для множества проектов, осуществляемых в рамках общей программы или деятельности компании. Включает использование методов программы или деятельности компании. Включает использование методов распределения ресурсов между проектами при учете общих заданных ограничений и требований.

Календарное планирование при ограниченных ресурсах (Resource Limited Scheduling) - календарное планирование работ с учетом ресурсных ограничений. Например, работы, требующие соответствующих ограниченных ресурсов, планируются к выполнению в сроки, когда ресурсы становятся доступными.

Календарное планирование при ограничении по времени (Time Limited Scheduling) - календарное планирование работ с учетом временных ограничений в проекте. Например, требуется составить календарный план так, чтобы заданная продолжительность проекта или любые другие установленные сроки не были нарушены.

Календарный план (Schedule) - совокупность сроков начала и окончания работ, совершения событий проекта. Один из главных инструментов управления проектом.

Календарный план без ограничений (Unlimited Schedule) - календарный план, составленный без учета ограничений по ресурсам и срокам.

Ключевое событие (Key Events) - важное событие, свершение которого, как предполагается, имеет ключевое значение для выполнения проекта. Обычно принадлежит критическому пути сетевого графика проекта.

Количественная оценка риска (Risk Quantification) - процесс определения количественных величин различных аспектов рисков. Например: вычисление вероятности наступления рискового события и оценка его последствий.

Комплексное материально - техническое обеспечение (Integrated Logistics Support) - упорядоченный подход к выполнению работ, необходимых: для системного рассмотрения вопросов обеспечения процесса реализации проекта на стадии проектирования и разработки проекта. для разработки плана работ по комплексному материально -техническому обеспечению проекта, логически увязанному с проектированием и другими фазами осуществления

проекта. для выполнения плана обеспечения проекта в установленные сроки при оптимальных затратах.

Контроль (Control) - процесс сравнения фактического выполнения с запланированным, анализ отклонений, оценка возможных альтернатив и принятие, в случае необходимости, корректирующих действий для ликвидации нежелательных отклонений от базового уровня показателей.

Контроль затрат (Cost Control) - контроль изменений, относящихся к бюджету проекта.

Контроль изменений предметной области (Scope Change Control) - контроль за изменениями в предметной области проекта.

Контроль расписания (Schedule Control) - контроль изменений в календарном плане (расписании) проекта.

Контроль реагирования на риск (Risk Response Control) - контроль реагирования на изменения риска на протяжении всего хода выполнения проекта.

Контрольное событие / Веха (Milestone) - значительное событие в проекте, обычно завершение одного из основных результатов.

Контрольные показатели эффективности (Key Performance Indicators) - количественно измеримые показатели, которые должны быть использованы для подготовки отчетности о ходе работ, выбранные таким образом, чтобы отражать критические факторы успеха проекта.

Корректирующее действие (Corrective Action) - изменения, вносимые для приведения прогноза выполнения проекта в соответствие с планом.

Косвенные затраты (Indirect Cost) - затраты, относящиеся к проекту, которые не могут быть непосредственно отнесены на какую-либо работу или группу работ.

Критерии успеха и неудачи проекта (Project Success and Failure Criteria) - совокупность показателей, которые дают возможность судить об успешности или неуспешности выполнения проекта

Критическая работа (Critical Activity) - работа, принадлежащая критическому пути. В большинстве своем определяется в результате сетевого анализа с использованием Метода Критического Пути.

Критический путь (Critical Path) - в сетевой модели (диаграмме) проекта - последовательность работ и зависимостей, определяющая самое раннее завершение проекта. Критический путь будет изменяться время от времени в зависимости от того, завершаются ли работы до срочно или позже плановых сроков. Хотя обычно критический путь вычисляется для всего проекта, он может быть определен также для контрольных событий или для подпроектов. Критический путь обычно составляют работы, резерв времени которых меньше или равен установленной величине, чаще всего нулю.

Критический фактор успеха (Critical Success Factor) - фактор, считающийся наиболее способствующим достижению успеха проекта.

Ленточная диаграмма / Линейный график (Bar Chart) - графическое

отображение информации, связанной с расписанием работ. В обычном

линейном графике работы или другие элементы проекта перечисляются сверху вниз по левой стороне графика, шкалы времени. Даты показаны вверху диаграммы, а продолжительность работ отображена в виде горизонтальных лент (полос) в масштабе времени, размещенных в соответствии с датами начала и окончания. Также называется графиком Ганнта.

Лестница (Ladder) - механизм отображения набора совмещенных по времени работ на сетевой модели. Примечание: Начало и окончание каждой последующей работы привязаны только к началу и окончанию предшествующей работы с помощью временных связей

Логические отношения / Зависимости (Logical Relationship) - зависимость между двумя работами проекта или между работой проекта и ключевым событием. Используются, как правило, четыре типа логических отношений (взаимосвязей между граничными точками двух работ): · «Окончание - Начало»: предшествующая работа должна закончиться до того, как последующая работа может начаться. · «Окончание - Окончание»: предшествующая работа должна закончиться до того, как закончится последующая работа. «Начало - Начало»: предшествующая работа должна начаться до того, как последующая работа может начаться.

«Начало - Окончание»: предшествующая работа должна начаться до того, как последующая работа может закончиться.

Метод "Делфи" (Delphi Technique) - исследовательский метод, в результате которого согласованная точка зрения достигается за счет консультации с экспертами. Часто используется, как метод оценки работ, решения спорных вопросов, выбора подходов и т. д.

Процедура координации проекта (Project Co - ordination Procedure) -

определение сторон, участвующих в проекте, и согласованных средств обмена информацией между ними

Процент выполнения (Percent Complete - PC) - доля завершённой работы или группы работ, выраженная в процентах объёма, который был выполнен.

Процесс (Process) - совокупность взаимосвязанных работ и ресурсов, шагов или процедур, ведущих к результату, через преобразование входных данных в выходные.

Прямой проход (Forward Path) — процесс вычисления дат раннего начала и раннего окончания для незаконченных частей всех работ сети.

Прямые затраты (Direct Costs) - основная часть издержек производства, включающая заработную плату рабочих; стоимость сырья; материалов, изделий и деталей; расходы по эксплуатации оборудования. Это затраты, которые привязаны к конкретной работе или группе работ без их расчленения. (Прямые затраты больше всего отличаются от накладных расходов, которые не могут быть установлены для отдельных работ.)

Путь (Path) - совокупность последовательно соединённых вершин и дуг (работ, зависимостей и/или событий) в сетевой модели проекта.

Работа (Activity) - элемент проекта, выполняемый в процессе его осуществления. Работа обычно имеет ожидаемую (плановую) продолжительность (длительность), предполагаемую (ожидаемую) стоимость и требуемые ресурсы. Работа часто подразделяется на задания.

Работа, близкая к критической (Near- Critical Activity) - работа с небольшим общим резервом времени.

Работа, допускающая перерывы (Splittable Activity) - работа, допускающая перерывы и возможности временной переброски занятых на ней ресурсов на другие работы.

Работа, зависящая от объема ресурса (Effort - Driven Activity) - работа, продолжительность которой зависит от наличия и интенсивности потребления ресурсов.

Разработка плана проекта (Project Plan Development) - использование результатов других процессов планирования в проекте и их включение в единый, последовательный и согласованный документ.

Разработка расписания (Schedule Development) - анализ последовательности работ, продолжительности работ и их потребности в ресурсах с целью составления календарного плана выполнения работ проекта.

Разрешение на начало работ (Approval to Proceed) - санкционирование руководством начала работ в проекте или на очередной фазе проекта.

Ранние сроки (Early Dates) - Дата раннего начала и Дата раннего окончания.

Расписание проекта (Project Schedule) - плановые даты для выполнения работ и плановые даты для наступления контрольных (ключевых) событий («вех») проекта.

Решение проблем (Problem Solving) - определение последовательных систематических процедур, с помощью которых анализируются и решаются проблемные ситуации.

Риск проекта (Project Risk) - опасность возникновения непредвиденных ситуаций или рисков событий в проекте, которые могут негативно или позитивно воздействовать на достижение целей проекта. Представляет собой сочетание вероятности или частоты проявления определенной угрозы или возможности и величины последствий рисков событий.

Риск, вторичный (Risk, Secondary) - риск, который может возникнуть в результате преодоления некоторого первичного риска.

Рисковое событие (Risk Event) - отдельное событие, способное повлиять на проект в худшую или лучшую сторону.

Свободный резерв (Free Float - FF) - количество времени, на которое может быть задержано выполнение работы без изменения даты раннего начала любой непосредственно следующей за ней работы. См. также Резерв.

Сглаживание потребности в ресурсе (Resource Smoothing) - метод календарного планирования работ при заданном директивном сроке завершения проекта, минимизирующий неравномерность потребления ресурсов в пределах имеющихся резервов времени.

Сдерживающий ресурс (Delaying Resource) - дефицитный ресурс, который при календарном планировании с учетом

ограниченных ресурсов может потребовать, чтобы выполнение некоторой работы было отложено до срока, когда этот ресурс будет доступен.

Сетевая диаграмма проекта (Project Network Diagram) - любое схематичное представление логических взаимосвязей между работами проекта. Всегда изображается слева направо для отображения хронологии проекта. Часто путается с «диаграммой PERT».

Сетевая логика (Network Logic) - набор работ, событий и зависимостей между ними, которые составляют сетевую модель (диаграмму) проекта и определяют порядок, в котором работы должны быть выполнены.

Сетевая модель (диаграмма) в масштабе времени (Time - Scaled Network Diagram) - любая сетевая диаграмма проекта, построенная таким образом, что месторасположение и длина; работы отображают сроки и продолжительность ее выполнения. Существенно, что эта линейная диаграмма включает логику сети.

Сетевое планирование - методы планирования с использованием техники сетевого моделирования и анализа комплекса взаимосвязанных работ.

Структурная декомпозиция работ (Work Breakdown Structure - WBS) - иерархическая структуризация работ проекта, ориентированная на основные результаты проекта, определяющие его предметную область. Каждый нижестоящий уровень структуры представляет собой детализацию элемента высшего уровня проекта. Элементом проекта может быть как продукт, услуга так и пакет работ или работа.

Структурная декомпозиция ресурсов (Resource Breakdown Structure) - иерархическая структуризация ресурсов проекта, соотнесенная со структурной декомпозицией работ. Каждый нижестоящий уровень структуры представляет собой детализацию элемента высшего уровня проекта. Элементом структурной декомпозиции ресурсов являются ресурсы, потребляемые данным элементом проекта.

Сфера приложения (Application Area) - категория проектов, которые имеют общие элементы, отсутствующие в других проектах. Прикладные области обычно определяются в терминах как продукта проекта (например, схожими технологиями или отраслями промышленности), так и типом заказчика (например, внутренние или внешние, правительственные или коммерческие). Сферы приложения часто пересекаются.

Текущая дата начала (Current Start Date) - текущая оценка ожидания сроков начала работы.

Текущая дата окончания (Current Finish Date) - оценка ожидания сроков окончания работы в текущий момент времени.

Текущая дата / Настоящее время (Time Now) - момент времени, относительно которого рассматривается состояние проекта и который разделяет «прошлое» и «будущее» в проекте.

Узловой сетевой график (Activity on Node Network) - метод построения сетевых диаграмм, а которых узлы (вершины графа) интерпретируются как работы, а дуги между ними - как зависимости.

Уклонение от риска (Risk Avoidance) - планирование мероприятий для избежания воздействий на проект некоторых выявленных рисков.

Укрупненный сетевой график (Master Network) - сводный сетевой график проекта, состоящий из укрупненных работ и ключевых контрольных событий (вех), предназначенный для высшего руководства.

Управление предметной областью проекта (Project Scope Management) - раздел управления проектами, включающий в себя процессы, необходимые для обеспечения того, что в проект включены все требуемые работы и только те работы, которые необходимы для успешного завершения проекта. Включает инициацию работ, планирование предметной области, определение предметной области, подтверждение предметной области и контроль изменений предметной области.

Управление проектом по временным параметрам (Project Time Management) - раздел управления проектами, включающий в себя процессы управления проектом по временным параметрам, необходимые для обеспечения своевременного завершения проекта, в т. ч.: определения работ, определения последовательности работ, оценки продолжительности работ, разработки календарного плана и контроля календарного плана.

Управление проектом (Project Management - PM) - использование знаний, навыков, методов, средств и технологий при выполнении проекта с целью достижения или превышения ожиданий участников проекта.

Управление рисками в проекте (Project Risk Management) - раздел управления проектами, включающий в себя процессы, связанные с определением, анализом и соответствующими мерами реагирования на риски в проекте. Включает прогнозирование и

определение рисков, количественную оценку рисков, разработку методов реагирования на риски и контроль реагирования на риски.

Управление системами (Systems Management) - деятельность, охватывающая процессы разработки и уточнения требований, условий и спецификаций на технические, организационные, экономические, временные и прочие параметры систем, (включая принадлежащие им программы и проекты), а также последующее управление процессами жизненного цикла реализации концепции создания системы, включая: планирование, проектирование, поставки, выполнение работ, испытания элементов системы и др.

Научное издание

Нина Адамовна Дегтярева

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ**
Монография

Издательство ЗАО «Библиотека А.Миллера»
454091, г. Челябинск, ул. Свободы, 159

Подписано к печати 03.10.2019
Формат 60x84 1/16 Объем 10,0 уч-изд.л.
Заказ № 537 Тираж 500 экз
Отпечатано на ризографе в типографии ФГБОУ ВО ЮУрГГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69