

Моделирование сетевого графика проекта в условиях ограниченности ресурсов

О.Н. Яркова, Н.А. Сидоренко

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Одной из основных причин повышения рисков проекта является нехватка ресурсов. Разработка методики, позволяющей проводить моделирование сетевых графиков в условиях ограниченности ресурсов, с учетом стохастического влияния рисков на сроки выполнения работ проекта является целью настоящего исследования. В работе проведен анализ инструментов для моделирования графиков работ проектов; приведено описание математической модели оценки стоимости проекта на основе сетевого графика в условиях ограниченности ресурсов; предложен способ моделирования сетевого графика в среде AnyLogic; разработан алгоритм моделирования параллельно-выполняемых ветвей графика работ проекта в условиях ограниченности ресурсов; описана методика моделирования сетевого графика работ проекта. Апробация проведена на основе сетевого графика проекта строительства контактной линии опоры. Методика может применяться для проектов, описываемых сетевыми графиками и позволит оптимизировать ресурсы, выделяемые на реализацию проекта с учетом времени и стоимости проекта, вырабатывать оптимальные решения по управлению рисками проекта.

Ключевые слова: сетевой график, план работ, имитационное моделирование, анализ рисков, время выполнения проекта, стоимость проекта.

Введение

Постоянные изменения экономических условий функционирования предприятий и организаций являются источником возникновения предпринимательских рисков. Строительные работы зачастую связаны с проведением сложных комплексов работ, которые, как правило, описывают в виде сетевых графиков. В сетевом планировании и управлении под риском понимается вероятность нарушения тендерных сроков и стоимости проекта. Реализация таких рисков существенно влияет на эффективность функционирования предприятия, его конкурентоспособность и финансовую устойчивость, поэтому для управления рисками строительных проектов важно анализировать возможное влияние условий реализации проекта строительства на стоимость и время его выполнения. Одной из основных причин повышения рисков проекта является нехватка ресурсов. Построение

модели, позволяющей оценивать влияние ресурсов на стоимость и время выполнения проекта является основной целью настоящего исследования.

Моделированию времени и стоимости проектов, описываемых сетевыми графиками посвящено большое количество научных публикаций.

Так, например, изучением процесса управления проектными рисками занимался Ещенко Р.В.[1]. Автором предложен алгоритм оптимизации сетевого графика проекта путем сведения двухкритериальной задачи оптимизации к однокритериальной с равными коэффициентами при целевых функциях. Автор предложил двухоценочную модель управления рисками, которая заключается в минимизации количества работ со средними и высокими степенями риска относительно их временных и стоимостных характеристик. Христофорова К.А. и др. [2] анализирует вопросы управления сетевыми графиками проектов строительства при воздействии различных факторов, вносящих неопределённость в процесс реализации проекта, с использованием матриц Эйзенхауэра. Романников А.Н. и Теселкина Е.С.[3] предложили модель оптимизации проекта по стоимости и времени его выполнения с учетом рисков. Учитывать риски проекта авторы предлагают путем введения штрафов за каждую единицу времени превышения продолжительности проекта и добавления их суммарного значения к минимизируемой функции затрат. Предложенная авторами методика справедлива в предположении о нормальном законе распределения продолжительности проекта и приводит к занижению оценок времени выполнения проекта. Фулкерсоном Д. в работе [4] предложен метод получения нижней оценки для математического ожидания времени выполнения проекта в предположении, что продолжительность работ описывается случайной величиной с дискретным распределением. Метод Фулкерсона Д. был обобщен Клингеном Г.[5] для случая непрерывных функций распределения, но для его реализации необходимо

многомерное интегрирование и, как следствие, метод практически не применим для графиков сложной структуры. Кларк Г.[6] аналитически оценивал математическое ожидание и дисперсию сроков свершения событий сети. Полученные в работах Фулкерсона Д., Клингена Г. и Кларка Г. методы не позволяют оценить закон распределения времени и стоимости выполнения проекта. Исследование вероятностных характеристик продолжительности проекта занимался Виленкин С.Я.[7]. Он оценивал вероятность того, что продолжительность проекта не превысит заданной величины. Однако, для случая сетевых графиков большого объема предлагаемый метод приводит к сложным вычислениям.

Более перспективными при исследовании рисков проектов являются методы имитационного и/или стохастического моделирования, реализуемые алгоритмически.

Петрунько А.О. [8] отмечает преимущество стохастических (Монте-Карло) и смешанных методов сетевого моделирования (диаграммы Ганта, CPM, PERT), а также отмечает эффективность применения программного обеспечения (ПО) (Microsoft Project, Primavera, Gantt Project и др.) для планирования проектов, но делает акцент на том, что далеко не все ПО позволяет создавать качественные и оптимальные сетевые графики крупных комплексных проектов. Новикова О.А., Матрохина К.В.[9,10] используют метод Монте-Карло для моделирования влияния рисков на инвестиционно-строительный проект на основе NPV. Новикова О.А. отмечает, что данный метод может быть использован для оценки бюджета, ресурсов и продолжительности строительства в условиях неопределённости. В работе [11] Филь О.А. применяет механизмы метода освоенного объема «EVA», которые включают в себя методы сетевого планирования: CPM, PERT/Time, PERT/Cost. Автор отмечает, что данные методы позволяют составлять и оптимизировать графики производства работ, формировать резервы времени,

прогнозировать стоимость и эффективность капиталовложений в проект.

Таким образом, анализ научных источников показывает, что современные исследования объединяют классические сетевые подходы с вероятностным и имитационным моделированием, что повышает точность прогнозирования сроков и затрат, а также позволяет учитывать влияние неопределенности на показатели проекта.

Проведем анализ инструментария для моделирования рисков проектов строительства. В ряде научных работ сосредоточенных на применении имитационного моделирования для расчета продолжительности и стоимости строительных проектов, выделены следующие программные решения: Oracle Primavera Risk Analysis[12]; AnyLogic[13]; Palisade @Risk (для MS Project и Excel)[14]; Symphony; Navisworks / Synchro 4D; MS Project[15] / Spider; Simul8; RiskyProject Professional; ModelRisk[16]; ADVANTA[17]; Tamara; Simio; OpenSIM. Приведем сравнительную характеристику некоторых программных продуктов:

- AnyLogic: сложный, требует знания Java и парадигм моделирования; модели могут быть «тяжёлыми» по вычислениям; нет шаблонов для CPM/PERT (требует кастомизации);

- Simul8: имеет ограниченные возможности для сложной статистики и глубокой аналитики; слабее поддерживает гибридные парадигмы (ABM+SD);

- RiskyProject: интерфейс и визуализация устаревшие; ограниченные возможности по кастомизации моделей; плохо подходит, если требуется моделировать детальную динамику ресурсов/логистики (DES/ABM);

- Palisade @Risk (Excel): проблемы с производительностью при больших симуляциях (ограничения Excel); сложность поддержки больших моделей; нельзя моделировать динамику и очереди (DES) «по-умолчанию»;

- ModelRisk: Зависимость от Excel-интерфейса; интерфейс и подход ориентированы на статистику, не на визуализацию;

- Tamara: нельзя создавать графики с нуля и полноценно редактировать связи; ограниченная гибкость в моделировании сценариев;
- Primavera RiskAnalysis: не обновлялся более 10 лет, сложный интерфейс, ограниченные возможности моделирования рисков;
- Navisworks / Synchro (4D BIM): не выполняет симуляции неопределённости;
- Simio: высокая стоимость лицензии; сложность обучения; есть, но меньше чем в AnyLogic возможностей программирования; при очень больших моделях возможны потребности в мощном оборудовании.

Анализ программных инструментов позволил сделать выбор в пользу AnyLogic как исследовательской платформы для моделирования рисков. Несмотря на то, что AnyLogic не имеет встроенных инструментов для моделирования сетевых графиков проектов, он достаточно гибкий, что позволяет дополнять функционал за счет программного кода, адаптированного под конкретную задачу.

Цель и задачи исследования

Цель: разработать методику, позволяющую проводить моделирование сетевых графиков в условиях ограниченности ресурсов, с учетом стохастического влияния рисков на сроки выполнения работ проекта. Задачи: описать математическую модель оценки стоимости проекта на основе сетевого графика в условиях ограниченности ресурсов; разработать способ моделирования сетевого графика в среде AnyLogic; разработать алгоритм моделирования параллельно-выполняемых ветвей графика работ проекта в условиях ограниченности ресурсов; описать методику моделирования сетевого графика работ проекта; провести апробацию.

Модели и методы исследования

Предположим, что для выполнения комплекса работ используется два

вида ресурсов: рабочие и техника – под этим понимается виды технических средств, необходимых для выполнения работы. В рассматриваемой модели предполагается, что ресурсы (обозначим их $res[k]$, в общем случае $k=1,..n$, где n – количество видов таких ресурсов) могут использоваться на все виды работ. Освобожденные ресурсы после завершения очередной работы перераспределяются на другие работы. В более общем случае количество видов ресурсов в модели можно увеличить (масштабировать), не теряя общности построения модели, и разделить, например технику по типам: землеройная, подъёмно-транспортная, дорожно-строительная и т.п. с уточнением какой именно вид техники используется при выполнении конкретной работы. Аналогично можно разделить по типам кадровые ресурсы: по специализации работников, например, слесарь, монтажник и т.п. В соответствующий ресурс типа «техника» входит стоимость работы техники и стоимость работы человека, управляющего техникой.

Поставим задачу построения имитационной модели, позволяющей собирать статистику о продолжительности выполнения проекта и стоимости проекта в условиях ограниченных ресурсов. Нас будут интересовать:

- смоделированные значения времени выполнения проекта, заданного в виде сетевого графика, которые позволят оценить: закон распределения времени выполнения плана работ; ожидаемое значение продолжительности проекта M^T ; среднее квадратическое отклонение σ^T и другие характеристики; продолжительность проекта с заданной надежностью T^α , где α – заданный уровень надежности;

- смоделированные значения стоимости выполнения проекта, которые позволят оценить: закон распределения стоимости выполнения проекта; ожидаемое значение стоимости проекта M^C ; среднее квадратическое отклонение стоимости проекта σ^C и другие характеристики; стоимость проекта с заданной надежностью C^α .

На ресурсы k -го вида – $res[k]$, используемые в рамках каждой работы проекта, накладываются ограничения:

$$x_{res[k]}^{\min}(i, j) \leq x_{res[k]}(i, j) \leq x_{res[k]}^{norm}(i, j), \quad (1)$$

где $x_{res[k]}^{\min}(i, j)$ – минимальное необходимое количество ресурсов k -го вида для выполнения работы (i, j) проекта; $x_{res[k]}^{norm}(i, j)$ – количество ресурсов k -го вида, требуемое для выполнения работы (i, j) при нормальных условиях протекания работы (за минимальное время).

Количество доступных ресурсов влияет на характеристики продолжительности работы. В частности, предположим, что продолжительность работы (i, j) описывается по закону распределения $H^{(i, j)}(v)$, где v в общем случае это набор параметров, характеризующих закон распределения. К примеру, продолжительность работы описывается треугольным законом распределения с параметрами $v=(v_1, v_2, v_3)$, где v_1 – минимальное значение параметра, v_2 – мода, v_3 – максимальное значение. Тогда зависимость параметров закона распределения может быть задана, к примеру, соотношением:

$$t_2 = t_{(i, j)}^{norm} \prod_{k=1}^n (1 + R_{res[k]}(i, j))^{x_{res[k]}^{norm}(i, j) - x_{res[k]}(i, j)}, \quad (2)$$

где $t_{(i, j)}^{norm}$ – мода для времени выполнения работы (i, j) при нормальном значении всех ресурсов для работы (i, j) ; $x_{res[k]}(i, j)$ – количество ресурса $res[k]$, используемое при реализации работы (i, j) ; $R_{res[k]}(i, j)$ – коэффициент, позволяющий оценить на сколько увеличится время выполнения работы (i, j) при снижении количества ресурса $res[k]$ на 1 единицу.

Для реализуемости проекта необходимо соблюдение условия:

$$res[k] \geq \max_{(i, j)} \{x_{res[k]}^{\min}(i, j)\}, \forall k = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Стоимость проекта определяется величиной:

$$C = C_1 + \sum_{(i,j)} t(i,j) \left(\sum_{k=1}^n C_{res[k]} x_{res[k]}(i,j) \right), \quad (4)$$

где C_1 – фиксированная стоимость, не зависящая от продолжительности проекта; $t(i,j)$ – продолжительность работы (i,j) , при очередной имитации; $C_{res[k]}$ – стоимость использования единицы ресурса $res[k]$ в единицу времени.

Опишем реализацию модели сетевого планирования в среде AnyLogic. Каждая работа сетевой модели моделируется комбинацией из двух блоков (рис.1а): Service и Delay. Для обозначения соответствия между сетевым графиком и сетевой моделью в AnyLogic основной блок типа Service, моделирующий работу (i,j) обозначен как Ri_j . Блок Delay в модели получает управление тогда, когда для выполнения работы связанного блока Service не достаточно какого-либо ресурса $res[k]$.

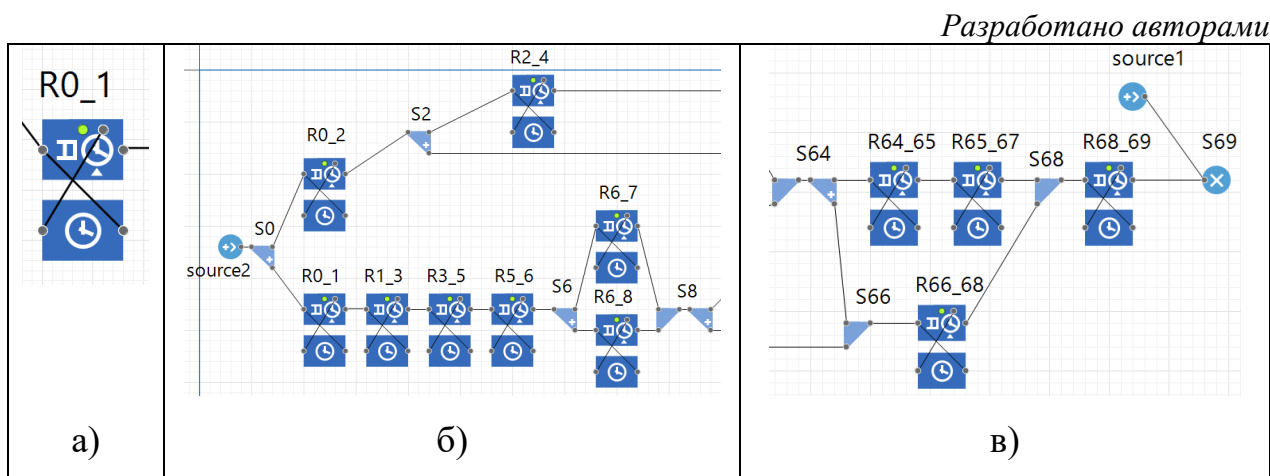


Рис. 1. – Реализация модели в AnyLogic: а) модель работы сетевого графика; б) фрагмент сетевого графика от начального события S0 до S8; в) фрагмент сетевого графика от S64 до завершающего события S69

Отметим, что в AnyLogic нет необходимости вводить фиктивные работы для отображения последовательности выполнения работ, последовательность задается путем настройки связей между блоками, при этом, для моделирования параллельных веток сетевого графика используется

блок Split (создает копию агента), для слияния веток блок Combine (объединяет копии агента) - они обозначены именами состояний Sk , там где это необходимо. Основную логику работы модели задают пути в графе модели, в частности разветвление и слияние процесса. Событие слияния и/или разветвления (Combine и/или Split соответственно) может свершиться только если завершились все ветки входящих потоков работ. Агент в модели – абстрактный элемент, который позволяет моделировать параллельное выполнение ветвей сетевого графика, проходя через блоки, моделирующие работы проекта. В рамках одного имитационного эксперимента в сетевом графике по графу движется только один агент.

В каждом блоке Service заданы действия, в виде программного кода на языке Java. Опишем логику работы блоков Service, моделирующих выполнение работ проекта.

Действия «при входе» описываются алгоритмом: для работы (i,j) соответствующего блока:

шаг 1. Считываем из файла данные, характеризующие работу: $t_{(i,j)}^{norm}$, $R_{res[k]}(i,j)$, $x_{res[k]}^{\min}(i,j)$, $x_{res[k]}^{norm}(i,j)$, $k=1,..n$;

шаг 2. Если для всех свободных ресурсов проекта $res[k], k=1,..n$ выполняется условие $res[k] \geq x_{res[k]}^{\min}(i,j)$ то шаг 3 иначе шаг 7;

шаг 3. Для $k=1,..n$: если $res[k] \geq x_{res[k]}^{norm}(i,j)$ тогда $x_{res[k]}(i,j) = x_{res[k]}^{norm}(i,j)$ иначе $x_{res[k]}(i,j) = res[k]$;

шаг 4. Для $k=1,..n$: $res[k] = res[k] - x_{res[k]}(i,j)$;

шаг 5. $t(i,j) = t_{(i,j)}^{norm} \prod_{k=1}^n (1 + R_{res[k]})^{x_{res[k]}^{norm}(i,j) - x_{res[k]}(i,j)}$

шаг 6. передать управление на шаг. 8;

шаг 7. приостановить вложенный блок delay;

шаг 8. конец.

Действия «при выходе по таймауту»: возобновляем работу вложенного в текущий блок процесса delay, извлекаем агента из Service.

Если при проверке «при входе» в блок Service оказалось, что не достаточно ресурсов для выполнения работы, агент передается в очередь и уходит по таймауту в блок задержки связанного блока Delay. В связанных блоках Delay установлена задержка до вызова событий stopDelay().

Действие «при начале задержки»: замеряем время начала выполнения текущей работы.

Действие «при подходе к выходу»: у каждого блока Service освобождаются занятые на выполнение соответствующей работы ресурсы, вызывается событие stopDelay() для всех блоков задержки Delay.

Действие «при выходе»: замеряем время окончания выполнения работы, вычисляем стоимость выполнения работы, в зависимости от доступных ресурсов и времени выполнения:

$$C_{(i,j)} = t(i,j) \left(\sum_{k=1}^n C_{res[k]} x_{res[k]}(i,j) \right), C = C + C_{(i,j)}.$$

Время задержки определяется согласно треугольному распределению с параметрами $triangular(0.8t(i,j), t(i,j), 1.2t(i,j))$, что позволяет учесть случайности в процессе выполнения работы.

Блок Source1 (рис.1в) – начинает выполнение процесса моделирования путем однократного срабатывания, включает инициализацию вспомогательных параметров модели, например, позволяет задать ресурсы для проекта, фиксированную величину C_1 и т.п.. Блок S69 (Sink) (рис.1в) характеризует выполнение одной итерации моделирования сетевого графика, содержит операторы добавляющие вычисленные данные C и Tkr (Tkr – длина критического пути) в датасеты, начинает очередную итерацию путем вызова функции source2.inject(1). Source2 (рис.1б) после вызова

source2.inject(1) обнуляет данные C и Tkr , запускает новую итерацию – генерирует агента, который моделирует процесс выполнения работ.

Вычислительный эксперимент

В работе рассматривается проект строительства контактной линии на 10 кВ [18]. Сетевой график представлен на рис.2. В таблице 1 представлен фрагмент таблицы наименований работ и соответствующих характеристик проекта.

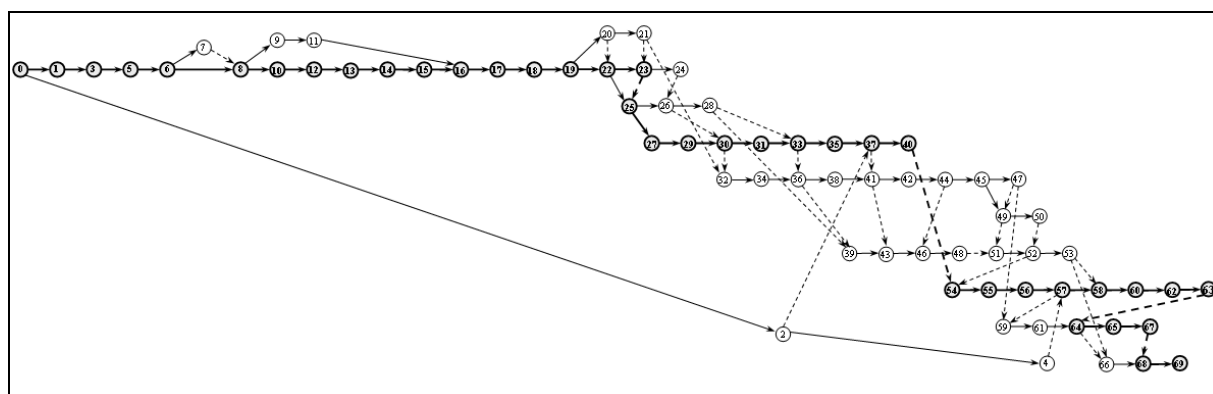


Рис. 2. – Сетевой график исследуемого проекта [18]

Таблица № 1

Наименования и характеристики работ проекта

Работа (i,j)	Наименование работы	t , час.	Рабочие				Техника			
			x^{min} , чел	x^{norm} , чел	R	C , руб.	x^{min} , шт.	x^{norm} , шт.	R	C , руб.
0-1	Инженерно-геодезические изыскания	9.6	1	4	0.4	4579.1	0	0	0	0
1-3	Погрузочные работы	1.6	2	4	1.2	2633.5	0	0	0	0
3-5	Перевозка бетонных и ж/б материалов	0.9	0	0	0	0	1	1	0	1679.7
5-6	Разгрузочные работы	1.0	2	4	0.9	754.2	0	0	0	0
6-7	Развозка конструкций и материалов	1.0	2	3	0.8	1930.4	1	1	0	2861.0
6-8	Развозка конструкций и материалов опор	1.7	2	3	0.7	2272.7	1	1	0	3102.3
	...									
64-65	Работа на отвале	0.7	1	2	2.5	4747.8	1	1	0	4801.8
65-67	Засыпка траншей и котлованов бульдозерами	0.4	0	0	0	0	1	1	0	4596
68-69	Засыпка вручную траншей, паук котлованов и ям	0.4	1	4	0.40	4978.9	0	0	0	0

Проводилось 1000 имитаций. Временные и стоимостные характеристики проекта, при вариации доступного количества ресурсов приведены в таблице 2.

Таблица № 2

Временные и стоимостные характеристики проекта

Доступные ресурсы		Характеристики времени, час.			Характеристики стоимости, тыс.руб.		
рабочие	техника	M^T	σ^T	$T^{0.95}$	M^C	σ^C	$C^{0.95}$
2	1	475.19	0.89	475.96	13420.86	69.22	13532.59
2	3	447.50	0.49	447.72	13226.65	68.02	13341.06
3	1	369.22	0.39	369.61	13450.13	75.35	13571.89
3	2	371.49	0.78	372.79	13403.29	74.69	13523.59
5	2	293.13	0.34	293.57	13178.64	78.03	13308.31
7	2	277.04	0.26	277.32	13241.46	79.35	13380.03
∞	∞	260.45	0.65	260.67	13228.50	86.66	13374.06

Результаты экспериментов показывают, насколько существенно влияет количество ресурсов на временные и стоимостные характеристики проекта. Таким образом, приведенная методика позволяет получить характеристики времени и стоимости проекта в условиях риска, где продолжительности работ заданы как случайные параметры, в условиях ограниченности ресурсов. При жестких ограничениях на ресурсы (выполнение условия 3 со знаком равенства) – время выполнения проекта увеличивается в 1.8 раза.

Заключение

В работе представлена методика, позволяющая проводить моделирование сетевых графиков в условиях ограниченности ресурсов, с учетом стохастического влияния рисков на сроки выполнения работ проекта в среде AnyLogic. Применение предложенной методики позволяет оценить закон распределения времени выполнения проекта – в виде оценки плотности распределения вероятностей; ожидаемое значение продолжительности проекта; среднее квадратическое отклонение; продолжительность проекта с

заданной надежностью и другие характеристики; закон распределения стоимости выполнения проекта – в виде оценки плотности распределения вероятностей; ожидаемое значение стоимости проекта; среднее квадратическое отклонение стоимости проекта; стоимость проекта с заданной надежностью и другие характеристики. Методика может применяться для различных проектов, описываемых сетевыми графиками и позволит решать ряд практических задач: оптимизировать ресурсы, выделяемые на реализацию проекта с учетом времени и стоимости проекта, анализировать риски, влияющие на реализацию проекта, вырабатывать оптимальные управленческие решения по управлению рисками проекта.

Литература

1. Ещенко Р.В. Двухоценочные модели управления проектными рисками. Дис. ...канд. техн. Наук. 05.13.10. М. 2012. 158 с.
 2. Христофорова К.А., Демидова В.С., Кривоги́на Д.Н. Управление календарно-сетевыми графиками строительства в условиях нестабильного мира. Инженерный вестник Дона. 2022. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8113.
 3. Романников А.Н., Теселкина Е. С. Математическая модель оптимизации параметров проекта. Транспортное дело России. 2010. №7. С. 55-57.
 4. Fulkerson D.R. Expected critical path lengths in PERT networks. Operation Research. 1962. Vol. (X). № 6. Pp. 808-817.
 5. Clingen G.T. A Modification of Fulkerson's PERT algorithm. Operation Research. 1964. Vol. (XII). № 4. Pp. 629-632.
 6. Glark G.F. The greatest of a finite set of random variables. Operation Research. 1965. Vol. (IX). № 2. Pp. 145-162.
 7. Виленкин С.Я. Определение закона распределения максимального времени. Автоматика и телемеханика. 1965. Т (XXVI). № 7. С. 1247–1252.
-

8. Петрунько А.О. Вопросы применения методов сетевого моделирования при управлении инновационными проектами модернизационного характера в условиях неопределенности. Экономика строительства и городского хозяйства. 2024. № 3. С. 213–224.

9. Новикова О.А., Смоляков Д.А., Хромов Е.В. К вопросу совершенствования методологических подходов к управлению инвестиционными проектами. Управленческий учет. 2024. № 12. С. 158–163.

10. Матрохина К.В., Трофимец В.Я., Мазаков Е.Б., Маховиков А.Б., Хайкин М.М. Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса. Записки Горного института. № 259. С. 112–124.

11. Филь О.А., Зантария Л.Т. Методика оперативного планирования инвестиционно-строительного проекта на базе прогнозирования учета стоимости. Вестник евразийской науки. 2022. Т. (XIV). № 5. С. 13.

12. Namdeo A., Raj R.K., Scholar P.G. Monitoring & Scheduling of a Metro Project (Bhopal) Work Using Project Management Tool Primavera P6: A Review. International Journal of Scientific Research in Civil Engineering. 2021. Vol. (V). № 3. Pp. 162-169.

13. Afanasyev M., Pervukhin D., Kotov D., Davardoost H., Smolenchuk A. System Modeling in Solving Mineral Complex Logistic Problems with the Anylogic Software Environment. Transportation Research Procedia. 2023. Vol. (LXVIII). Pp. 483–491.

14. Zakia B. Using Monte Carlo Simulation To Mitigate The Risk Of Project Cost Overruns. Proceedings of the 10th International Conference on Risk Analysis. 2016. Vol. (VI). № 2. Pp. 293-300.

15. Подойма С.В. Управление проектом привлечения финансирования с помощью Microsoft Project. Естественно-гуманитарные исследования. 2024. № 3. С. 287–290.

16. МоделРиск. Моделирование рисков в электронных таблицах. URL: riskstrategy.ru/modelrisk.
17. ADVANTA. Система управления проектами для бизнеса. URL: advanta-group.ru.
18. Яркова О.Н., Величко О.А. Моделирование стратегии проведения комплекса работ по проекту монтажа сетей электроснабжения. Северный регион: наука, образование, культура. 2014. № 2. С. 60-68.

References

1. Eshchenko R.V. Dvukhotsenochnye modeli upravleniya proektnymi riskami. [Two-price models for managing project risks]. Dis. ...kand. tekhn. Nauk. 05.13.10. M. 2012. 158 p.
2. Khristoforova K.A., Demidova V.S., Krivogina D.N. Inzhenernyy vestnik Dona. 2022. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8113.
3. Romannikov A.N., Teselkina E. S. Transportnoe delo Rossii. 2010. №7. Pp. 55-57.
4. Fulkerson D.R. Operation Research. 1962. Vol. (X). № 6. Pp. 808-817.
5. Clingen G.T. Operation Research. 1964. Vol. (XII). № 4. Pp. 629-632.
6. Glark G.F. Operation Research. 1965. Vol. (IX). № 2. Pp. 145-162.
7. Vilenkin S.Ya. Automation and Remote Control. 1965. Vol (XXVI). № 7. Pp. 1247–1252.
8. Petrun'ko A.O. Economics of Civil Engineering and Municipal Economy. 2024. № 3. Pp. 213–224.
9. Novikova O.A., Smolyakov D.A., Khromov E.B. Management Accounting. 2024. № 12. Pp. 158–163.
10. Matrokhina K.V., Trofimets V.Ya., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., Khaykin M.M. Journal of Mining Institute. 2023. № 259. Pp. 112–124.
11. Fil' O.A., Zantariya L.T. The Eurasian Scientific Journal. 2022. T. (XIV). № 5. Pp. 13.

12. Namdeo A., Raj R.K., Scholar P.G. Monitoring & Scheduling of a Metro Project (Bhopal) Work Using Project Management Tool Primavera P6: A Review. International Journal of Scientific Research in Civil Engineering. 2021. Vol. (V). № 3. Pp. 162-169.
13. Afanasyev M., Pervukhin D., Kotov D., Davardoost H., Smolenchuk A. System Modeling in Solving Mineral Complex Logistic Problems with the Anylogic Software Environment. Transportation Research Procedia. 2023. Vol. (LXVIII). Pp. 483–491.
14. Zakia B. Using Monte Carlo Simulation To Mitigate The Risk Of Project Cost Overruns. Proceedings of the 10th International Conference on Risk Analysis. 2016. Vol. (VI). № 2. Pp. 293-300.
15. Podoyma S.V. Natural-Humanitarian Studies. 2024. № 3. Pp. 287–290.
16. ModelRisk. Modelirovanie riskov v elektronnykh tablitsakh. URL: riskstrategy.ru/modelrisk.
17. ADVANTA. Sistema upravleniya proektami dlya biznesa. URL: advanta-group.ru.
18. Yarkova O.N., Velichko O.A. Severnyj region: nauka, obrazovanie, kul'tura. 2014. № 2. Pp. 60-68.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 8.10.2025

Дата публикации: 26.11.2025