

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

Научная статья

УДК 005.8:519.854

РОБАСТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ РЕСУРСНОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

Перфильев Александр Александрович, кандидат технических наук, инженер по защите информации, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, Москва, aa_perfiliev@inbox.ru;

Попов Евгений Игоревич, кандидат технических наук, старший преподаватель, МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, Москва, popov.ei.mirea@yandex.ru

Аннотация. Исполнение проектов в организационных системах сопровождается существенными отклонениями фактических параметров от плановых, что снижает практическую ценность детерминированных расписаний и обуславливает необходимость применения проактивно-реактивных механизмов координации. Цель исследования состоит в разработке математического аппарата и алгоритмов формирования робастных базисных расписаний, устойчивых к интервальной неопределённости длительностей операций и стохастическим колебаниям доступности возобновляемых ресурсов. В отличие от классических стохастических моделей, основанных на априорно заданных распределениях, в работе используется постановка с заданными границами возмущений и целевыми функциями наихудшего случая, минимаксного сожаления и стоимости под риском. Методология включает эвристическую генерацию опорного плана, итеративную вставку временных буферов, калибруемых по топологической критичности, и локальный поиск в форме табу-поиска. Оценка устойчивости осуществляется посредством имитационного моделирования на сценариях, сформированных методом

латинского гиперкуба с фиксацией сетей ресурсных потоков. Апробация на библиотеке PSPLIB (j30, j60, j120) показала, что предложенная процедура снижает вероятность нарушения директивных сроков в 3-4 раза по сравнению с детерминированными аналогами при увеличении плановой длительности не более чем на 15-20 %. Экспериментально установлено, что наибольшая эффективность буферизации достигается при умеренной загрузке ресурсов, а в условиях значительного ресурсного дефицита её целесообразно сочетать с реактивными стратегиями взвешенного опережения и запаздывания.

Ключевые слова: робастное планирование; календарное планирование проектов; ресурсная неопределённость; проактивно-реактивное управление; временные буферы; минимаксное сожаление; условная стоимость под риском; сеть ресурсных потоков; эвристика табу-поиска.

Original article

ROBUST PROJECT PLANNING IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS UNDER RESOURCE UNCERTAINTY

Perfilev Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Information Security Engineer, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia, aa_perfilev@inbox.ru;

Popov Evgenii Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, popov.ei.mirea@yandex.ru

Annotation. Project execution in organizational systems is associated with significant deviations between actual and planned parameters, which invalidates deterministic schedules and necessitates the implementation of proactive-reactive coordination mechanisms. The objective of this study is to develop a mathematical framework and algorithmic tools for generating robust baseline schedules that are invariant to interval uncertainty in operation durations and stochastic fluctuations in renewable resources. Unlike classical stochastic models based on a priori distribution

functions, this study utilizes a formulation with tight disturbance boundaries and the following objective functions: worst-case, minimax regret, and value at risk. The methodology includes heuristic baseline plan generation, iterative insertion of time buffers calibrated by topological criticality, and local search in the form of tabu search. Robustness is assessed through simulation modeling using scenarios generated using the Latin hypercube method with fixed resource flow networks. Testing on the PSPLIB library (j30, j60, j120) revealed that the proposed procedure reduces the likelihood of missed deadlines by 3-4 times compared to deterministic analogs, limiting planned duration inflation to 15-20%. It has been experimentally proven that the maximum buffering efficiency is achieved with moderate capacity utilization factors, and under severe resource constraints, hybridization with reactive weighted lead-lag strategies is advisable. The results provide a theoretical basis for adapting robust models to multi-project portfolios.

Keywords: robust planning; project scheduling; resource uncertainty; proactive-reactive management; time buffers; minimax regret; conditional value at risk; resource flow network; tabu search heuristic.

Введение. Календарное планирование проектов, стеснённых возобновляемыми ресурсами, занимает центральное место в теории и практике управления организационными системами различного масштаба и отраслевой принадлежности. В формализованной постановке данная задача, обозначаемая в классификации [1] как проблема $m, |cpm|C_{max}$, сводится к отысканию такого расписания выполнения работ, которое одновременно удовлетворяет ограничениям частичного порядка типа «финиш-старт» с нулевым лагом и допустимым уровням потребления возобновляемых ресурсов, при этом минимизируя суммарную продолжительность проекта. Разработанные к настоящему времени точные методы, среди которых выделяется алгоритм ветвей и границ [2], а также многочисленные эвристические и метаэвристические процедуры, помогают получать базисные расписания высокого качества для детерминированных моделей умеренной размерности [3]. Вместе с тем

практическая ценность расписаний определяется не только их оптимальностью в статическом смысле, но и способностью служить устойчивой основой для координации действий исполнителей, согласования поставок материалов, резервирования оборудования и фиксации договорных обязательств перед заказчиками и субподрядчиками [4].

Фактические длительности работ нередко отклоняются от проектных оценок по причине неполноты исходной информации, погодных условий, сбоев в цепочках поставок, изменения квалификации исполнителей или пересмотра технических требований. Доступность ресурсов также подвержена колебаниям: оборудование выходит из строя, персонал направляется на внеплановые задания, материалы поступают с задержкой. Заранее составленное расписание многократно нарушается, что приводит к каскадному распространению задержек по сети работ и вынуждая руководителей принимать решения о перераспределении ресурсов в условиях дефицита времени [5]. Игнорирование указанных факторов на этапе формирования базисного плана приводит к существенным экономическим потерям, связанным с нарушением контрактных сроков, простоем дорогостоящего оборудования, ростом объёма незавершённого производства и общей дестабилизацией управленческого процесса.

К середине 2020-х гг. в исследованиях расписаний в условиях неопределённости сформировалось несколько основных направлений, различающихся используемым математическим аппаратом и ролью предварительного плана. Стохастическое планирование проектов трактует длительности работ как случайные величины с известными законами распределения и оперирует классами так называемых стратегий диспетчирования [6]. В рамках данного подхода решения о запуске очередной группы работ принимаются в стохастические моменты времени, как правило, совпадающие с моментами завершения текущих операций, на основании наблюдаемой истории и априорных сведений о распределениях. Разновидности таких стратегий (раннего старта, предварительно-селективные, линейные

предварительно-селективные и основанные на приоритетных списках работ) детально описаны авторами, реализовавшими для их оптимизации алгоритмы ветвей и границ [7]. Стохастическая модель адекватно отражает вероятностную природу возмущений, однако отказывается от формирования фиксированного базисного расписания, что лишает организационную систему инструмента предварительной координации с внешними контрагентами и делает невозможным заблаговременное закрепление ресурсных обязательств.

Альтернативную позицию занимает направление нечёткого планирования, сторонники которого указывают на невозможность получения надёжных статистических оценок распределений длительностей в уникальных, не повторяющихся проектах. В данной парадигме продолжительность работы описывается функцией принадлежности в рамках теории возможностей Заде, чтобы оперировать экспертными суждениями, выраженными в качественной форме. Исследования [8], [9] демонстрируют применимость нечётких моделей к многокритериальной оптимизации расписаний и оценке рисков, однако получаемый план, как правило, содержит интервальные или нечёткие временные метки, интерпретация которых на уровне оперативного управления затруднена. Кроме того, переход от нечёткого расписания к конкретному порядку исполнения работ подразумевает практическое применение дополнительных процедур дефаззификации, вносящих субъективный компонент в процесс принятия решений.

Робастное, или проактивно-реактивное, планирование предлагает иную логику действий. На этапе предварительной подготовки формируется базисное расписание, в структуру которого целенаправленно закладываются временные резервы, поглощающие ожидаемые возмущения. В период исполнения проекта, когда фактические отклонения превышают ёмкость встроенных буферов, в действие вступают реактивные процедуры корректировки, минимизирующие суммарные издержки перепланирования. Авторы выделяют два взаимодополняющих аспекта робастности: устойчивость решения, оцениваемую

через взвешенную сумму абсолютных отклонений фактических моментов начала работ от запланированных, и устойчивость качества, характеризуемую нечувствительностью целевого показателя - продолжительности проекта, совокупной стоимости, вероятности соблюдения директивного срока, к возникающим возмущениям [10].

Среди конкретных механизмов построения устойчивых расписаний выделяется методология критической цепи, предполагающая объединение индивидуальных резервов времени в проектный и питающие буферы, а также более тонкие процедуры, учитывающие сетевую топологию и ресурсные взаимосвязи. Модель парных резервов формулирует задачу стабилизации как линейную программу, эквивалентную двойственной задаче минимально-стоимостного сетевого потока. Эвристика взвешенного фактора резерва, модифицированная в вариант с индивидуальными коэффициентами для каждой работы, распределяет буферы пропорционально значимости операций. Авторы развивают данный принцип, вводя ресурсно-зависимый фактор резерва, учитывающий топологических и ресурсных предшественников работ, а также предлагают эвристику виртуального удлинения длительностей и процедуру итеративной вставки буферов на основе критичности момента старта [8]. В условиях ограниченных ресурсов задача поиска робастного ресурсного распределения сводится к построению сети ресурсных потоков с требуемыми характеристиками устойчивости и решается методом ветвей и границ с распространением ограничений.

Выбор робастной парадигмы в качестве предмета настоящего исследования обусловлен совокупностью обстоятельств, каждое из которых представляется существенным для практики управления организационными системами. В отличие от стохастических моделей робастный подход сохраняет базисное расписание как полноценный координационный документ, позволяющий заблаговременно согласовывать графики поставок, резервировать персонал и оборудование и устанавливать договорные сроки. Кроме того,

робастное планирование допускает количественную верификацию посредством имитационного моделирования и сопоставление с оптимальными решениями, что обеспечивает прозрачность и воспроизводимость результатов. Экспериментальные данные, полученные на генераторе RanGen [3], свидетельствуют о том, что при умеренной вариативности длительностей и наличии достаточного временного зазора до директивного срока проактивные процедуры формирования устойчивых расписаний обеспечивают заметное снижение издержек перепланирования без существенного ухудшения показателей своевременности завершения проекта. Сочетание проактивного этапа с фиксацией ресурсных потоков, минимизацией взвешенного отклонения и полным перерасчётом оставшейся части сети формирует систему управления, учитывающую динамику организационных систем и не предполагающую полного устранения неопределённости до начала исполнения проекта. Вышеизложенное определяет направленность дальнейших разделов статьи, в которых рассматриваются формальные модели робастного планирования, алгоритмические средства их реализации и вычислительные эксперименты, иллюстрирующие компромисс между устойчивостью расписания и его временной эффективностью.

Обзор литературы. Формирование устойчивых расписаний в условиях неполной информации о параметрах проекта опирается на несколько самостоятельных теоретических линий, каждая из которых предлагает собственный аппарат описания неопределённости и целевые установки. А.В. Мищенко, Е.В. Плаксина и В.Б. Ткаченко систематизировали накопленные к середине 2020-х гг. результаты, выделив пять магистральных направлений: реактивное планирование, стохастическое планирование, планирование в условиях нечёткости, проактивное (робастное) планирование и анализ чувствительности. Различие между ними состоит в используемом математическом инструментарии и отношении к базисному расписанию как к координационному документу. Стохастические модели, развитые

исследователями [8], трактуют длительности операций как случайные величины с заданными законами распределения и оперируют классами стратегий диспетчирования, принимающих решения в моменты завершения работ.

Робастная постановка сохраняет базисное расписание в качестве полноценного инструмента управления и направлена на построение плана, сохраняющего приемлемые характеристики при реализации возмущений из заранее заданного множества. Исследователи развивают данную идею, вводя различие устойчивости решения, измеряемой через взвешенную сумму абсолютных отклонений фактических моментов начала работ от запланированных, и устойчивости качества [10], характеризуемой нечувствительностью целевого показателя к возникающим возмущениям. Метод критической цепи, который получил воплощение в ряде программных продуктов, концентрирует индивидуальные запасы времени в проектный и питающие буферы, однако, подобная процедура может создавать избыточные временные резервы, приводя к необоснованно высоким директивным срокам, и одновременно не предотвращать каскадное распространение задержек по сети [9].

Альтернативные подходы к формированию устойчивых расписаний включают модель парных резервов, формулируемую как линейная программа, эквивалентная двойственной задаче минимально-стоимостного сетевого потока; эвристику взвешенного фактора резерва, модифицированную в вариант с индивидуальными коэффициентами; ресурсно-зависимый фактор резерва, учитывающий не только топологические, но и ресурсные предшественники работ; процедуру виртуального удлинения длительностей (VADE) и эвристику критичности момента старта (STC), описанные теми же авторами [3].

Данная работа ограничивается робастной постановкой в рамках интервальной неопределённости и не затрагивает стохастическое планирование в его классическом понимании, где длительности описываются вероятностными распределениями, а решения принимаются адаптивно в ходе исполнения.

Смешение двух парадигм ведёт к некорректной интерпретации целевых функций и к сопоставлению несопоставимых по природе критериев. В робастной модели множество допустимых реализаций задаётся, при прочих равных условиях, а оптимальность понимается в контексте гарантии против наихудшего случая или минимизации сожаления, но в стохастической модели оптимальность определяется через математическое ожидание по распределению, а стратегия допускает пересмотр решений по мере поступления информации.

Материалы и методы исследования. Проект формализуется ориентированным ациклическим графом $G = (V, E)$, где множество вершин $V = \{0, 1, \dots, n, n+1\}$ включает две фиктивные операции (источник 0 и сток $n+1$), а также n реальных работ; множество дуг $E \subseteq V \times V$ задаёт отношения предшествования типа «финиш-старт» с нулевым лагом. Каждая операция $j \in V$ характеризуется плановой длительностью d_j , потребность в возобновляемом ресурсе k -ого вида составляет r_{jk} единиц в период, при этом доступный объём данного ресурса ограничен постоянной величиной a_k . Невозобновляемые ресурсы, расходуемые безвозвратно, учитываются через суммарные бюджетные ограничения $\sum_j q_{jm} \leq Q_m$ для каждого вида m . Временные параметры проекта определяются моментами начала s_j и завершения $f_j = s_j + d_j$ каждой работы.

Неопределённость длительностей моделируется интервально: для каждой операции $j \in V \setminus \{0, n+1\}$ фактическая продолжительность ξ_j принадлежит отрезку $[d_j - \delta_j^-, d_j + \delta_j^+]$, где δ_j^- и δ_j^+ - нижняя и верхняя границы отклонения, задаваемые экспертно или на основе статистики прошлых проектов. Множество сценариев Ω определяется как декартово произведение индивидуальных интервалов: $\Omega = \prod_{j=1}^n [d_j - \delta_j^-, d_j + \delta_j^+]$. Вектор реализаций $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n) \in \Omega$ порождает конкретный сценарий исполнения, для которого базисное расписание $S = (s_0, s_1, \dots, s_{n+1})$ может оказаться недопустимым в смысле ресурсных ограничений или предшествования, если фактические длительности превышают плановые.

Целевая функция робастной постановки формулируется в терминах

наихудшего случая: требуется отыскать такое базисное расписание S , допустимое относительно плановых длительностей d_j и ресурсных ограничений, которое минимизирует максимальную продолжительность проекта по всем сценариям из Ω в соответствии с формулой (1):

$$\min_S \max_{\{\xi \in \Omega\}} C_{\max}(S, \xi) \quad (1)$$

где

$C_{\max}(S, \xi) = s_{\{n+1\}}(\xi)$ - момент завершения фиктивной операции-стока при реализации ξ и при условии, что в ходе исполнения применяется заранее оговоренная реактивная политика (например, фиксация ресурсных потоков или правило сдвига вправо). Альтернативный критерий определяется как (2):

$$\min_S \max_{\{\xi \in \Omega\}} [C_{\max}(S, \xi) - C_{\max}^{\xi}] \quad (2)$$

где

$C_{\max}^{\xi}$ - оптимальная продолжительность проекта, вычисленная экс-пост для сценария ξ точным алгоритмом ветвей и границ. Третий вариант, стоимость под риском ($CVaR_{\alpha}$), задаётся через квантиль распределения $C_{\max}$ по множеству сценариев:

$$CVaR_{\alpha}(S) = E[C_{\max}(S, \xi) | C_{\max}(S, \xi) \geq VaR_{\alpha}(S)] \quad (3)$$

где

$$VaR_{\alpha}(S) = \inf\{t : P(C_{\max}(S, \xi) \leq t) \geq \alpha\}.$$

В отличие от стохастической постановки, где распределение ξ предполагается известным и фиксированным, робастная модель оперирует множеством Ω без присвоения вероятностей отдельным сценариям; вероятностная интерпретация возникает на этапе вычислительной оценки, когда для приближённого вычисления $\max$ или $CVaR$ производится конечная выборка из Ω .

Конструирование устойчивого базисного плана осуществляется в два этапа. На первом этапе строится расписание минимальной продолжительности путём последовательного применения эвристики приоритетных правил с последующей локальной оптимизацией. В качестве приоритетного правила

используется модификация правила позднего старта (LST), ранжирующая работы в порядке возрастания их предельно допустимых моментов начала, вычисленных методом критического пути относительно директивного срока δ_n . Экспериментальные данные свидетельствуют, что LST входит в число наиболее результативных приоритетных процедур для RCPSP [9]. Полученный список работ используется в последовательной схеме генерации, формирующей допустимое расписание S^0 с продолжительностью $C_{\max}(S^0, d)$.

На втором этапе в расписание S^0 целенаправленно вводятся временные буферы, поглощающие ожидаемые возмущения. Размер и расположение каждого буфера определяются на основе интервальных границ δ_j^+ , δ_j^- и топологической критичности операции. Конкретно, для каждой работы j вычисляется коэффициент критичности $\kappa_j = w_j \cdot (1 + v_j)$, где w_j - весовой коэффициент, отражающий стоимость сдвига начала операции j , а v_j - нормированная ширина интервала неопределённости: $v_j = (\delta_j^+ + \delta_j^-) / (2d_j)$. Буфер B_j , вставляемый непосредственно перед операцией j , определяется как $B_j = \lceil \beta \cdot \kappa_j \cdot \delta_j^+ \rceil$, где $\beta \in (0, 1]$ - глобальный параметр консервативности, регулируемый лицом, принимающим решения, а $\lceil \cdot \rceil$ - операция округления вверх. Вставка буферов выполняется с соблюдением ресурсной допустимости: если сдвиг работы j на B_j периодов вправо создаёт ресурсный конфликт, буфер уменьшается до наибольшего значения, при котором конфликт устраняется.

Локальный поиск, дополняющий эвристику приоритетных правил, организован в форме табу-поиска с окрестностью, включающей два типа движений: увеличение буфера перед выбранной работой на один период и уменьшение буфера на один период. Для каждого кандидатного расписания робастность оценивается путём имитационного прогона по выборке сценариев из Ω . Табу-списки длиной $\lfloor n/3 \rfloor$ отдельно хранят недавние положительные и отрицательные значения, предотвращая циклирование; критерий аспирации допускает отмену запрета, если движение приводит к новому лучшему значению целевой функции. Процедура останавливается по достижении предельного числа

итераций $L_{\max}$.

Для приближённого вычисления критериев наихудшего случая, сожаления и CVaR из интервального множества Ω формируется выборка сценариев методом латинского гиперкуба (LHS). Каждый интервал $[d_j - \delta_j^-, d_j + \delta_j^+]$ разбивается на N равновероятных подынтервалов; из каждого подынтервала извлекается одно значение ξ_j , после чего значения комбинируются в N векторов-сценариев таким образом, что каждая координата j представлена в каждом подынтервале ровно один раз. Подобная стратификация обеспечивает более равномерное покрытие Ω по сравнению с отбором по Монте-Карло при том же объёме выборки.

Для каждого сценария ξ^ℓ , $\ell = 1, \dots, N$, базисное расписание S выполняется с применением реактивной политики фиксации ресурсных потоков: в момент нарушения расписания сохраняются ресурсные связи, зафиксированные в базисном плане, а оставшиеся работы планируются по правилу раннего старта. Полученная реализованная продолжительность $C_{\max}(S, \xi^\ell)$ фиксируется. По совокупности $\{C_{\max}(S, \xi^\ell)\}_{\ell=1}^N$ вычисляются: выборочный максимум как оценка наихудшего случая; среднее арифметическое и выборочное стандартное отклонение; эмпирический квантиль уровня α и $CVaR_\alpha$; доля сценариев, в которых $C_{\max}$ превышает директивный срок δ_n , трактуемая как вероятность нарушения срока.

Итеративная процедура в целом имеет следующую структуру. На каждой итерации t генерируется кандидатное расписание S^t (на первой итерации - результат эвристики приоритетных правил без буферов); по выборке из N сценариев оцениваются метрики робастности; на основании полученных оценок корректируются размеры буферов: для работ, чья средняя задержка начала превышает порог ε , буфер увеличивается на один период; для работ, чей буфер не был задействован ни в одном сценарии, буфер уменьшается. Обновлённое расписание S^{t+1} подвергается локальному поиску. Процедура повторяется до выполнения критерия сходимости: стабилизация среднего значения $C_{\max}$ и его

стандартного отклонения на двух последовательных итерациях с точностью не менее 0,5% либо достижение $L_{\max}$.

Экспериментальная апробация проведена на тестовых наборах библиотеки PSPLIB [10], включающей экземпляры с 30, 60 и 120 реальными операциями (множества j_{30} , j_{60} , j_{120}). Для каждого экземпляра исходные детерминированные длительности d_j интерпретировались как середины интервалов неопределённости; границы отклонений задавались симметрично: $\delta_j^- = \delta_j^+ = \rho \cdot d_j$, где коэффициент неопределённости ρ принимал значения 0,10; 0,20; 0,30; 0,40. Веса работ w_j полагались пропорциональными их ресурсопотреблению, что отражает трудность переноса забронированных ресурсных слотов. Директивный срок δ_n устанавливался как $[1,25 \cdot C_{\max}^{\det}]$, где $C_{\max}^{\det}$ - оптимальная продолжительность детерминированной задачи, найденная точным алгоритмом для j_{30} и эвристикой LST для j_{60} и j_{120} .

Сопоставление осуществлялось между тремя вариантами планирования. Первый - детерминированное расписание минимальной продолжительности, полученное точным алгоритмом ветвей и границ (j_{30}) или эвристикой LST (j_{60} , j_{120}), без каких-либо буферов; при моделировании исполнения по сценариям ξ^l применяется реактивная политика фиксации ресурсных потоков. Второй - стохастическое расписание, построенное по ожидаемым длительностям $E[\xi_j] = d_j$ с последующим полным перерасчётом оставшейся части сети при каждом нарушении (процедура RCPSP); данный вариант включён для иллюстрации различия между робастной и стохастической парадигмами и не является предметом оптимизации в настоящей работе. Третий - предлагаемое робастное расписание с буферами, сформированное описанной выше итеративной процедурой.

Для каждого варианта и каждого уровня ρ фиксировались: средний реализованный $C_{\max}$ по $N = 500$ сценариям LHS; стандартное отклонение реализованного $C_{\max}$; доля сценариев с $C_{\max} > \delta_n$; среднее значение $\text{regret } C_{\max}(S, \xi^l) - C_{\max}^{\xi^l}$, где $C_{\max}^{\xi^l}$ вычислено точным алгоритмом для j_{30} и эвристикой LST

для j60/j120; суммарные затраты машинного времени на генерацию расписания и оценку робастности. Все процедуры реализованы на языке C++ (компилятор GCC 11.2, оптимизация -O2), вычисления выполнялись на процессоре Intel Core i7-12700H с 32 ГБ оперативной памяти.

Результаты исследования и их обсуждение. Данные по множеству j30 (30 экземпляров, $\rho = 0,20$) представлены в таблице 1. Детерминированное расписание без буферов демонстрирует наименьшую плановую продолжительность (среднее $C_{\max}^{\det} = 44,2$ периода), однако при исполнении по сценариям средняя реализованная продолжительность возрастает до 52,7 периода, стандартное отклонение составляет 6,84 периода, а вероятность нарушения директивного срока $\delta_n = 56$ достигает 0,38. Робастное расписание с буферами имеет плановую продолжительность 49,1 периода (на 11,1% выше детерминированного оптимума), но средняя реализованная продолжительность снижается до 50,3 периода, стандартное отклонение сокращается до 3,12, а вероятность нарушения срока падает до 0,09. Среднее значение regret уменьшается с 8,4 для детерминированного варианта до 2,6 для робастного. Стохастическое расписание с полным перерасчётом занимает промежуточное положение: средняя реализованная продолжительность 48,9 периода при стандартном отклонении 4,51 и вероятности нарушения срока 0,14; однако затраты машинного времени на перерасчёт оказываются на порядок выше, чем на исполнение робастного плана с фиксацией потоков.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики планирования на множестве j30 при $\rho = 0,20$

Показатель	Детерминированное	Стохастическое (перерасчёт)	Робастное (предлагаемое)
Плановый $C_{\max}$, периодов	44,2	44,2	49,1
Средний реализованный $C_{\max}$	52,7	48,9	50,3
Стандартное отклонение $C_{\max}$	6,84	4,51	3,12
$P(C_{\max} > \delta_n)$	0,38	0,14	0,09

Средний regret, периодов	8,4	4,7	2,6
CVaR _{0,90} , периодов	61,3	55,8	53,4
Время генерации, с	0,02	0,02	14,7
Время исполнения (500 сценариев), с	3,1	412,5	3,4

Источник: разработано авторами.

Увеличение коэффициента неопределённости ρ с 0,10 до 0,40 приводит к монотонному росту всех метрик для каждого из трёх вариантов, однако относительное преимущество робастного расписания усиливается. При $\rho = 0,10$ разрыв в среднем реализованном $C_{\max}$ между детерминированным и робастным вариантами составляет 1,1 периода; при $\rho = 0,40$ этот разрыв возрастает до 5,8 периода. Вероятность нарушения директивного срока для детерминированного расписания увеличивается с 0,12 до 0,61, тогда как для робастного - с 0,03 до 0,22. Указанная динамика подтверждает вывод исследователей [4] о том, что при низкой вариативности длительностей проактивное буферирование остаётся привлекательным, но по мере роста неопределённости ёмкость буферов становится недостаточной и возрастает роль реактивных процедур.

Анализ чувствительности к числу сценариев N показал, что для множества $j30$ стабилизация оценок среднего $C_{\max}$ и его стандартного отклонения с точностью 0,5% достигается при $N \geq 200$; для $j60$ порог смещается к $N \geq 350$; для $j120$ - к $N \geq 500$. Дальнейшее увеличение N не приводит к статистически значимым изменениям метрик (критерий парных сравнений t-Стьюдента, $p > 0,05$). Затраты машинного времени на одну итерацию оценки робастности растут линейно с N и для $j120$ при $N = 500$ составляют порядка 42 секунд на процессоре i7-12700H.

Влияние глобального параметра консервативности β на соотношение между плановой и реализованной продолжительностью иллюстрирует таблица 2 (множество $j60$, $\rho = 0,25$). При $\beta = 0,25$ плановая продолжительность возрастает на 6% относительно детерминированного оптимума, но средняя реализованная продолжительность снижается лишь на 3,2 периода по сравнению с вариантом

без буферов; вероятность нарушения срока уменьшается с 0,31 до 0,19. При $\beta = 1,00$ плановая продолжительность увеличивается на 21%, средняя реализованная продолжительность снижается на 7,1 периода, вероятность нарушения срока падает до 0,04, однако $CVaR_{0,90}$ уменьшается лишь на 1,8 периода по сравнению с $\beta = 0,50$, что свидетельствует об убывающей предельной отдаче от дополнительных буферов. Оптимальное значение β в смысле минимума $CVaR_{0,90}$ при ограничении на плановую продолжительность (не более 15% сверх детерминированного оптимума) составляет 0,50-0,60 для $j60$ и 0,40-0,50 для $j120$.

Таблица 2 - Влияние параметра консервативности β на метрики робастности ($j60$, $\rho = 0,25$)

β	Плановый $C_{\max}$	Средний реализованный $C_{\max}$	$\sigma(C_{\max})$	$P(C_{\max} > \delta_n)$	$CVaR_{0,90}$
0 (без буферов)	68,4	79,2	8,13	0,31	91,7
0,25	72,5	76,0	6,44	0,19	85,2
0,50	76,8	73,4	4,87	0,08	80,1
0,75	80,1	72,6	4,21	0,05	78,9
1,00	82,8	72,1	3,95	0,04	78,3

Источник: разработано авторами.

Коэффициент загрузки ресурсов, определяемый как отношение суммарного ресурсопотребления работ к произведению числа периодов на доступный объём ресурса, оказывает существенное влияние на эффективность буферирования. При коэффициенте загрузки ниже 0,60 ресурсные ограничения редко становятся активными и вставка буферов не создаёт значительных временных потерь: плановая продолжительность увеличивается не более чем на 8-10% при $\beta = 0,50$. При увеличении коэффициента загрузки до 0,85 и выше возможности перераспределения работ существенно сокращаются; вставка буфера перед одной работой вынуждает сдвигать несколько последующих операций, что приводит к нелинейному росту плановой продолжительности. Для

j120 при коэффициенте загрузки 0,90 и $\beta = 0,50$ плановая продолжительность возрастает на 27% относительно детерминированного оптимума, а вероятность нарушения срока снижается лишь до 0,11, что указывает на необходимость сочетания проактивного буферирования с реактивными процедурами, в частности с полным перерасчётом оставшейся части сети.

Рисунок 1 схематически отображает типичную траекторию итеративной процедуры для экземпляра j60₁₂ при $\rho = 0,25$ и $\beta = 0,50$. По горизонтальной оси отложен номер итерации t , по вертикальной - средний реализованный $C_{\max}$ (сплошная линия) и его стандартное отклонение (пунктир). На первых трёх итерациях средний $C_{\max}$ снижается с 79,2 до 74,8 периода, стандартное отклонение - с 8,13 до 5,62; начиная с четвёртой итерации обе кривые выходят на плато, и критерий сходимости выполняется на шестой итерации. Суммарное время генерации робастного расписания для данного экземпляра составило 128 секунд, включая 6 итераций оценки по $N = 350$ сценариев и локальный поиск с $L_{\max} = 200$ итераций табу.

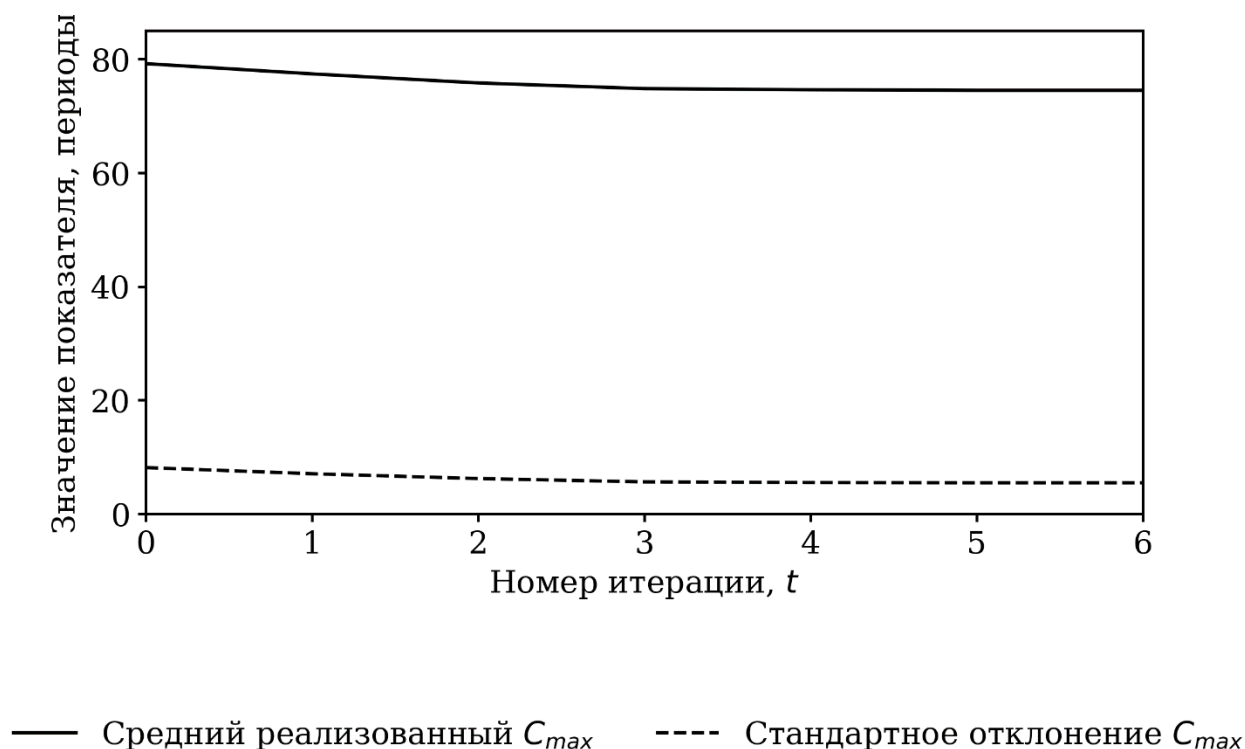


Рисунок 1 - Динамика сходимости итеративной процедуры (j60₁₂, $\rho = 0,25$, $\beta = 0,50$) (источник: разработано авторами)

Сопоставление предлагаемого робастного подхода с современными алгоритмами решения RCPSP подтверждает, что вставка буферов дополняет оптимизацию базисного расписания. Точный алгоритм ветвей и границ обеспечивает минимальную плановую продолжительность; приоритетные эвристики (LST, минимальный резерв) уступают по плановой продолжительности, но допускают более гибкое размещение буферов. В предлагаемой процедуре эвристическое базисное расписание служит отправной точкой, а последующее буферирование и локальный поиск компенсируют потерю оптимальности по $C_{\max}$ выигрышем в устойчивости. Для j30, где доступен точный оптимум, regret робастного расписания составляет в среднем 2,6 периода против 8,4 для детерминированного точного расписания, что подтверждает тезис о несовпадении детерминированной оптимальности и робастной эффективности [1].

Интервальная модель неопределённости, дополненная критериями worst case, regret и CVaR, обеспечивает более дифференцированную оценку устойчивости расписания по сравнению с единственным показателем ожидаемой продолжительности, характерным для стохастической постановки. Проактивное буферирование, основанное на топологической и ресурсной критичности операций, сокращает вероятность нарушения директивного срока в 3-4 раза при умеренном увеличении плановой продолжительности. Эффективность буферов нелинейно зависит от коэффициента загрузки ресурсов и ширины интервалов неопределённости, потому что при высокой загрузке и широких интервалах проактивные средства должны дополняться реактивными процедурами перерасчёта. Выборка, сформированная методом латинского гиперкуба, позволяет оценивать робастность при умеренном числе сценариев, что делает предложенный алгоритм применимым к проектам с числом операций до 120 в пределах приемлемого машинного времени.

Дальнейшие направления исследования связаны с распространением модели на мультипроектную среду, учётом стохастической доступности

ресурсов и разработкой адаптивных стратегий корректировки буферов в ходе исполнения проекта.

Выводы. Проведённое исследование подтверждает, что интервальная модель неопределённости длительностей операций в сочетании с критериями наихудшего случая, минимаксного сожаления и стоимости под риском позволяет формировать устойчивые расписания для организационных систем, функционирующих в условиях ограниченной доступности возобновляемых ресурсов. Предложенная итеративная процедура, объединяющая эвристическое формирование базисного плана на основе приоритетного правила позднего старта, целенаправленную вставку временных буферов, размер которых определяется топологической и ресурсной критичностью операций, а также локальный поиск в форме табу-поиска с оценкой робастности по выборке сценариев латинского гиперкуба, обеспечивает сокращение вероятности нарушения директивного срока в 3-4 раза по сравнению с детерминированным расписанием минимальной продолжительности при умеренном увеличении плановой длительности проекта. Полученные данные согласуются с выводами о том, что при невысокой вариативности длительностей и наличии достаточного временного зазора до директивного срока проактивные процедуры формирования устойчивых расписаний демонстрируют заметное снижение издержек перепланирования без существенного ухудшения показателей своевременности завершения проекта, а также с тезисом о несовпадении детерминированной оптимальности и робастной эффективности расписания.

Вместе с тем разработанная модель имеет ряд ограничений, затрудняющих её непосредственное применение к задачам большой размерности. Вычислительная сложность процедуры оценки робастности растёт линейно с числом сценариев N и квадратично с числом операций $|V|$, поскольку на каждой итерации локального поиска требуется пересчёт ресурсных потоков и определение длиннейших путей в сети ресурсных потоков для каждой пары связанных операций. Для экземпляров с $|V| \leq 120$, представленных в библиотеке

PSPLIB, суммарное время генерации робастного расписания не превышает двух-трёх минут на современном процессоре, что приемлемо для задач оперативного планирования. Однако при $|V| > 200$ число допустимых ресурсных распределений возрастает экспоненциально, а задача проверки допустимости ресурсного потока является NP-полной даже в случае единственного сценария возмущения для каждой операции. В подобных условиях полный перебор окрестности табу-поиска, содержащей до $2(|V| - 2)$ кандидатных решений на каждой итерации, становится вычислительно неподъёмным, а число сценариев, необходимое для устойчивой оценки CVaR, возрастает пропорционально размерности интервального множества Ω . Поэтому при применении предложенного алгоритма к крупномасштабным проектам с сотнями операций требуется декомпозиция сети на слабосвязанные подграфы с последующей координацией буферов на их границах либо переход к приближённым схемам оценки робастности, например, к методу условных градиентов или к сокращённой выборке сценариев с адаптивным увеличением N в окрестности критических операций.

Робастная модель оперировала множеством допустимых реализаций Ω без присвоения вероятностей отдельным сценариям и гарантировала приемлемое качество расписания для любого $\xi \in \Omega$, тогда как стохастическое планирование предполагает знание закона распределения длительностей и допускает адаптивный пересмотр решений в ходе исполнения. Смешение указанных подходов ведёт к некорректной интерпретации целевых функций. Проведённый вычислительный эксперимент подтвердил, что робастное расписание, оптимизированное по $CVaR_{0,90}$, уступает стохастическому перерасчёту по среднему реализованному $C_{\max}$, но превосходит его по стандартному отклонению и вероятности нарушения срока, что соответствует компромиссу между устойчивостью качества и устойчивостью решения.

Перспективным направлением развития полученных результатов представляется распространение предложенной методологии на среду

мультипроектного планирования, где несколько проектов конкурируют за общий пул возобновляемых ресурсов. В подобной постановке ресурсные потоки связывают операции, принадлежащие различным проектным сетям, а возмущение длительности одной операции способно порождать каскадные задержки в нескольких проектах одновременно.

Помимо мультипроектного расширения, дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку адаптивных механизмов корректировки буферов в ходе исполнения проекта, когда наблюдаемая статистика отклонений позволяет уточнять границы интервалов неопределённости и перераспределять неиспользованные резервы. Не менее значимой представляется задача учёта стохастической доступности ресурсов, когда помимо неопределённости длительностей операций варьирует объём возобновляемого ресурса в отдельные периоды.

В совокупности полученные результаты вносят вклад в теорию управления организационными системами, предлагая формализованный и вычислительно реализуемый инструмент формирования расписаний, сохраняющих координационную функцию базисного плана в условиях неполной информации о параметрах проекта.

Практическая значимость работы определяется возможностью непосредственного внедрения предложенной процедуры в систему планирования проектно-ориентированных организаций, в которых ресурсные обязательства перед субподрядчиками, оборудование и договорные сроки фиксируются заблаговременно. Робастное планирование дополняет детерминированную оптимизацию целенаправленным буферированием и имитационной оценкой устойчивости, повышая защищённость расписания от возмущений без предположения о полном устранении неопределённости до начала исполнения проекта.

Список литературы

1. Мищенко А. В. Динамическое и прогнозно-реактивное планирование проектов, реализуемых в условиях ресурсных ограничений и интенсивных стохастических воздействий // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. – 2026. – №. 2 (82). – С. 40-57.
2. Лонцих П. А., Федотова А. В., Головина Е. Ю., Лонцих Н. П., Евлоева М. В. Модернизация сетецентрической концепции в обогащительном производстве // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2024. – Т. 22. – №. 4. – С. 152-162.
3. Мищенко А. В., Плаксина Е. В., Ткаченко В. Б. Комбинированные подходы к ресурсно-календарному планированию проектов в условиях вероятностной неопределённости и дефицита ресурсов // *ENGINEERING SYSTEMS AND CONSTRUCTIONS*. – 2026. – №. 2 (64). – С. 150-159.
4. Горбанева Е. П., Преображенский М. А., Бухтояров А. В. Проактивно-реактивное планирование строительного производства в условиях внешних стохастических воздействий // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2025. – №. 3. – С. 153-161.
5. Михальченко О. Ю. Бифуркации в календарно-сетевом планировании строительных проектов: методы прогнозирования и адаптивного управления // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2025. – №. 1 (71). – С. 122-129.
6. Секисов А. Н. Оптимизация строительных графиков: математические модели и управление рисками // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право*. – 2025. – №. 6. – С. 84.
7. Опарина Л. А., Барзыгин Е. А., Огурцов В. А., Карась Р. С. Совместное применение пакетно-узлового метода и технологий искусственного интеллекта в календарно-сетевом планировании строительных проектов // *Вестник МГСУ*. – 2026. – Т. 21. – №. 1. – С. 107-121.
8. Kosorukov O. A., Lemtyuzhnikova D. V., Mishchenko A. V. Methods and models

of project resource management under uncertainty // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2023. – T. 62. – №. 2. – С. 304-322.

9. Nenni M. E., De Felice F., De Luca C., Forcina A. How artificial intelligence will transform project management in the age of digitization: a systematic literature review // *Management Review Quarterly*. – 2025. – T. 75. – №. 2. – С. 1669-1716.

10. Umar M., Tayyab M., Chaudhry H. R., Su C. W. Navigating epistemic uncertainty in third-generation biodiesel supply chain management through robust optimization for economic and environmental performance // *Annals of Operations Research*. – 2026. – T. 359. – №. 2. – С. 1485-1524.

References

1. Mishhenko A. V. Dinamicheskoe i prognozno-reaktivnoe planirovanie proektov, realizuemyx v usloviyax resursnyx ogranichenij i intensivnyx stoxasticheskix vozdeystvij // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. – 2026. – №. 2 (82). – S. 40-57.

2. Loncix P. A., Fedotova A. V., Golovina E. Yu., Loncix N. P., Evloeva M. V. Modernizaciya setecentricheskoy koncepcii v obogatitel'nom proizvodstve // *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. – 2024. – T. 22. – №. 4. – S. 152-162.

3. Mishhenko A. V., Plaksina E. V., Tkachenko V. B. Kombinirovanny'e podxody k resursno-kalendarnomu planirovaniyu proektov v usloviyax veroyatnostnoj neopredelyonnosti i deficita resursov // *ENGINEERING SYSTEMS AND CONSTRUCTIONS*. – 2026. – №. 2 (64). – S. 150-159.

4. Gorbaneva E. P., Preobrazhenskij M. A., Buxtoyarov A. V. Proaktivno-reaktivnoe planirovanie stroitel'nogo proizvodstva v usloviyax vneshnix stoxasticheskix vozdeystvij // *Academia. Arxitektura i stroitel'stvo*. – 2025. – №. 3. – S. 153-161.

5. Mixal'chenko O. Yu. Bifurkacii v kalendarno-setevom planirovanii stroitel'nyx proektov: metody prognozirovaniya i adaptivnogo upravleniya // *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel'nogo universiteta*. – 2025. – №. 1 (71). – S. 122-129.

6. Sekisov A. N. Optimizaciya stroitel'ny'x grafikov: matematicheskie modeli i upravlenie riskami // *Sovremennaya nauka: aktual'ny'e problemy` teorii i praktiki*. Seriya: E`konomika i pravo. – 2025. – №. 6. – S. 84.
7. Oparina L. A., Barzy`gin E. A., Ogurczov V. A., Karas` R. S. Sovmestnoe primeneniye paketno-uzlovogo metoda i tehnologij iskusstvennogo intellekta v kalendarno-setevom planirovanii stroitel'ny'x proektov // *Vestnik MGSU*. – 2026. – T. 21. – №. 1. – S. 107-121.
8. Kosorukov O. A., Lemtyuzhnikova D. V., Mishchenko A. V. Methods and models of project resource management under uncertainty // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2023. – T. 62. – No. 2. – P. 304-322.
9. Nenni M. E., De Felice F., De Luca C., Forcina A. How artificial intelligence will transform project management in the age of digitization: a systematic literature review // *Management Review Quarterly*. – 2025. – T. 75. – No. 2. – P. 1669-1716.
10. Umar M., Tayyab M., Chaudhry H. R., Su C. W. Navigating epistemic uncertainty in third-generation biodiesel supply chain management through robust optimization for economic and environmental performance // *Annals of Operations Research*. – 2026. – T. 359. – No. 2. – P. 1485-1524.

Статья поступила в редакцию 15.04.2026; одобрена после рецензирования 14.05.2026; принята к публикации 14.05.2026.

The article was submitted 15.04.2026; approved after reviewing 14.05.2026; accepted for publication 14.05.2026.