

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 153–161.
Academia. Architecture and Construction, no. 3, pp. 153–161.

Исследования и теория
Научная статья
УДК 69.05
DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-153-161

Проактивно-реактивное планирование строительного производства в условиях внешних стохастических воздействий

Горбанева Елена Петровна (Воронеж). Кандидат технических наук, доцент. Кафедра технологии, организации строительства, экспертизы и управления недвижимостью Воронежского государственного технического университета (Россия, Воронеж, улица 20-летия Октября, 84. ВГТУ). Эл. почта: egorbaneva@cchgeu.ru

Преображенский Михаил Артемьевич (Воронеж). Кандидат физико-математических наук, доцент. Кафедра физики Воронежского государственного технического университета (Россия, Воронеж, улица 20-летия Октября, 84. ВГТУ). Эл. почта: mpreobrazhenskij@cchgeu.ru

Бухтояров Александр Васильевич (Воронеж). Кафедра технологии, организации строительства, экспертизы и управления недвижимостью Воронежского государственного технического университета (Россия, Воронеж, улица 20-летия Октября, 84. ВГТУ). Эл. почта: example14@gmail.com

Аннотация. Исчерпание возможностей экстенсивного развития строительной отрасли привело к тому, что задача оптимального планирования строительных проектов, реализуемых в условиях ресурсных ограничений и стохастических воздействий, привлекает значительный и постоянно возрастающий интерес исследователей и практиков. Основная часть исследований выполняется в рамках проактивно-реактивного или реактивного планирования с учётом действия стохастических факторов на длительность реализуемых процедур. Такой подход характеризуется значительной субъективной составляющей и не применим для новых или уникальных проектов. Альтернативные инновационные методы практически применимы только для проектов, реализуемых в условиях слабых стохастических воздействий. В работе, по результатам которой написана статья, построен свободный от этих ограничений алгоритм моделирования сценариев реализации проекта, реализуемого в условиях интенсивных стохастических воздействий. Сформулированы методы построения дерева процессов и система равенств, количественно описывающих условия успешной реализации всех процессов проекта. Анализ предложенного в статье вектора текущего объёма процесса позволил количественно описать динамику технологических взаимосвязей и оптимизировать методы реализации всех согласованных процессов проекта.

Ключевые слова: планирование, моделирование, строительное производство, стохастические воздействия, проект

Для цитирования: 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. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-153-161.

Proactive and Reactive Planning of Construction Production under Conditions of External Stochastic Influences

Gorbaneva Elena P. (Voronezh). Candidate of Sciences in Technology, Docent. The Department of Technology, Organization of Construction, Expertise and Property Management of the Voronezh State Technical University (84, str. 20-letia Oktyabrya, Voronezh, Russia. VSTU). E-mail: egorbaneva@cchgeu.ru

© Горбанева Е.П., Преображенский М.А., Бухтояров А.В., 2025.

Preobrazhensky Mikhail A. (Voronezh). Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Docent. The Department of Physics of the Voronezh State Technical University (84, str. 20-letia Oktyabrya, Voronezh, Russia. VSTU). E-mail: mpreobrazhenskij@cchgeu.ru

Bukhtoyarov Alexander V. (Voronezh). The Department of Technology, Organization of Construction, Expertise and Property Management of the Voronezh State Technical University (84, str. 20-letia Oktyabrya, Voronezh, Russia. VSTU). E-mail: example14@gmail.com

Abstract. The exhaustion of the possibilities of extensive development of the construction industry has led to the fact that the problem of optimal planning of construction projects implemented under resource constraints and stochastic impacts attracts significant and constantly growing interest of researchers and practitioners. The main part of the research is carried out within the framework of proactive-reactive or reactive planning taking into account the effect of stochastic factors on the duration of the procedures being implemented. This approach is characterized by a significant subjective component and is not applicable to new or unique projects. Alternative innovative methods are practically applicable only to projects implemented under weak stochastic impacts. In the work, based on the results of which the article was written, an algorithm for modeling scenarios for the implementation of a project implemented under intense stochastic impacts is constructed, free from these limitations. Methods for constructing a process tree and a system of equalities quantitatively describing the conditions for the successful implementation of all project processes are formulated. The analysis of the vector of the current process volume proposed in the article made it possible to quantitatively describe the dynamics of technological interrelations and optimize the methods for implementing all agreed processes of the project.

Keywords: planning, modeling, construction production, stochastic impacts, project

Для цитирования. Gorbaneva E.P., Preobrazhensky M.A., Bukhtoyarov A.V. Proactive and Reactive Planning of Construction Production Under Conditions of External Stochastic Influences. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2025, no. 3, pp. 153–161, doi: 10.22337/2077-9038-2025-3-153-161.

Введение

Современный этап развития экономики России характеризуется нарастанием негативных тенденций, связанных, в частности, с ресурсными ограничениями, главными из которых являются ограничения, определяемые недостатком персонала [1]. Оптимальным по соотношению затраты/отдача методом увеличения эффективности строительного производства является совершенствование планирования [2]. В связи с этим, проблемы планирования строительных проектов в условиях ресурсных ограничений и неопределённости широко изучаются в последнее время [3]. Однако, большинство исследований описывают детерминированные системы. Активизировались также и исследования стохастических систем, в которых чаще всего в качестве единственного источника неопределённости рассматривается продолжительность работ. Эти исследования развивались в двух направлениях: чисто реактивное [4] и проактивно-реактивное планирование [5].

Поскольку проактивное планирование создаёт базовое расписание до начала выполнения проекта, не имея возможности корректировать изменения, происходящие в процессе выполнения, оно не может генерировать оптимальное расписание. В противоположность этому, реактивное планирование оптимизирует деятельность в соответствии с текущим состоянием проекта в процессе его выполнения, но в нём отсутствует базовое расписание. Преодоления этого противоречия возможны в рамках метода критической цепи,

алгоритмы которого дают возможность избежать ограничения методов проактивного и реактивного планирования. Такая возможность обеспечивается единым способом описания проекта как на этапе планирования, так и на этапе мониторинга и контроля хода его реализации [6].

Реактивное календарное планирование осуществляется в предположении известных вероятностных распределений случайных величин, в большинстве случаев направлено на оптимизацию ожидаемого времени выполнения расписания или других регулярных показателей эффективности. Однако на практике полная продолжительность работ представляет собой один из самых распространённых видов неопределённости в управлении проектами. Вследствие этого задача планирования строительных проектов направлена на поиск целесообразного времени начала и окончания каждого вида работ, удовлетворяющего временным и ресурсным ограничениям, с целью оптимизации определенного показателя эффективности.

Методы проактивного и реактивного планирования строительных проектов

Большинство исследований в этой области основывалось на детерминированном подходе, который предполагает, что все входные данные известны и стохастическими воздействиями можно пренебречь. Однако на практике в ходе выполнения проекта часто возникают различные неопределённости,

включая продолжительность работ, предложение ресурсов, спрос на ресурсы и т.д. Вследствие этого статическое расписание не позволяет описать дерево возможных сценариев как в случае детерминированных задач. Вместо этого реализация проекта рассматривается как многоступенчатый процесс принятия решений, а календарный план составляется поэтапно. На каждом этапе в рамках проактивно-реактивного планирования контролируется выполнение проекта [7]. В этом подходе базовый вариант календарного плана формируется до начала выполнения строительных работ в проактивной фазе. Такой план используется, в частности, для распределения времени и ресурсов и для обмена информацией между разнородными участниками реализации жизненного цикла проекта. Базовый план должен предусматривать резервирование ресурсов и средств, объём которых определяется в соответствии с выбранной мерой надёжности. В работе [8] предложена классификация надёжности в проактивном планировании и разделение интегральной надёжности на два вида: надёжность качества планирования и надёжность решения. Надёжность качества обеспечивает приемлемую вероятность завершения проекта в срок. В противоположность этому надёжность решения обеспечивает минимизацию вариативности базового плана. Эти критерии обычно конкурируют друг с другом, что делает процесс интегральной оптимизации двухкритериальными. Проактивное базовое планирование с прогнозируемым временем начала и длительности работ было реализовано в статье [9] в предположении фиксированных штрафов за изменения в базовом расписании.

Первоначальный базовый календарный план строится лишь на основе информации, доступной до начала строительных работ, но даже и в этом подходе точная задача оптимизации является экспоненциально сложной. Метод сведения задачи оптимизации базового плана к реально разрешимой предложен в работах [2; 10]. На последующем этапе строительства в ходе выполнения проекта становится доступной информация, которую можно использовать для упреждающего изменения календарного плана и его динамической адаптации к реальным условиям с целью повышения интегральных характеристик проекта. Для этого методы позволяют использовать преимущества поступающей информации и основаны на динамическом программировании. В работе [11] подробно рассмотрено влияние неопределённости длительностей процессов с известным совместным распределением вероятности на планирование строительного производства. Например, в строительном проекте из-за погодных условий, материалов и человеческого фактора работы часто не могут быть завершены в срок. На практике управление этими сценариями проекта часто требует составления базового расписания для целей планирования до начала проекта, а затем мониторинга и контроля проекта во время его выполнения, чтобы убедиться, что проект будет выполнен в срок и в рамках бюджета [12].

Статический подход к составлению расписания, также известный как политика открытого цикла, направлен на полу-

чение упреждающего расписания до начала реализации проекта. Самым простым и популярным методом являются эвристические правила, основанные на приоритетах. В этой связи в работе [13] исследовалась эффективность 17-ти основных приоритетных правил. В статье [14] тестировалась применимость различных правил приоритета в рамках свёртывания для решения многорежимной Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)¹ в условиях неопределённости.

Для достижения качества и эффективности решения в работе [5] была разработана гибридная схема приближенного динамического программирования (ADP), объединяющая метод таблиц поиска в обучении с подкреплением и политикой развёртывания. В статье [15] на основе тестирования инновационных алгоритмов (динамического программирования, генетического алгоритма, оптимального реактивного базового алгоритма и эвристического алгоритма на основе приоритетов) было показано, что эти алгоритмы хорошо работают только для решения задач с низким уровнем неопределённости.

Другое направление исследований направлено на создание надёжного базового расписания с минимальными вероятностями отклонений во время выполнения проекта [16]. Предложенный Э. Голдраттом метод критической цепи (CCM) стал основой многочисленных исследований в областях управления проектами и составления расписаний [17; 18]. Однако ни в одном из этих исследований CCM не применялась для работы с RCPSP в условиях неопределённости.

Несмотря на то, что подход динамического планирования позволяет повысить качество принимаемых решений, размерности не позволяют реально использовать его для оптимизации крупных проектов. Это возможно при двухстадийном подходе к решению задачи RCPSP в условиях неопределённости. В этом подходе CCM используется для составления проактивного базового расписания, а процедура динамического планирования применяется для корректировки расписания в реактивном режиме.

Для повышения эффективности реактивного планирования в алгоритме ADP разработан метод таблиц поиска с использованием CCM [19]. Такой подход позволяет оптимизировать планирование проектов с ограниченными ресурсами в условиях неопределённости. Однако реактивное планирование в таком подходе не позволяет описать влияние параметров проекта и подрядных организаций, привлечённых к его реализации, на динамику реализации календарного плана в условиях стохастических воздействий. Решить эту задачу позволяет предложенный в работе [20] метод расчёта динамики и длительности выполнения технико-технологических процессов, детерминированная, часть которого основана на объективных характеристиках нескладируемых ресурсов с учётом влияния воздействий на профиль использования и

¹ Данное обозначение метода, общепринятое в научной литературе, возникло в 1983 году. Данный метод решает задачи ресурсно-календарного планирования проекта с учётом ограничений на ресурсы.

производительность ресурсов, качественно различных дискретных и непрерывных стохастических механизмов.

Моделирование сценариев реализации проекта в условиях интенсивных стохастических воздействий

Методы проактивного поточного планирования строительного производства в условиях стохастических воздействий слабой интенсивности позволяют формировать календарные планы, удовлетворяющие требованиям практики. При этом основной областью применения методики поточного планирования строительного производства является массовое индустриальное строительство. Но даже и в этом случае организация ритмичных потоков возможна только при выполнении весьма строгих, практически не реализуемых, ограничений [21]. Стохастические воздействия приводят к необходимости априорного демпфирования базового проактивного плана, значительно снижающего эффективность проекта. Кроме того, стандартный метод поточного планирования на основе длительностей технологических процессов не позволяет описать зависимости параметров календарного плана от характеристик подрядных организаций, реализующих проект.

Сформулируем алгоритм проактивно-реактивного планирования, свободный от этих недостатков и позволяющий осуществить моделирование сценариев реализации проекта в условиях интенсивных стохастических воздействий.

Проактивный план может быть построен на базе векторов процессов ($P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$) и нескладируемых ресурсов ($R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$), связи которых определяются матрицами мощностей PR и фронтов работ VF . Все эти объекты не зависят от конкретного реализуемого проекта, а определяются технологией строительного производства и свойствами нескладируемых ресурсов. Для описания детерминированной динамики реализации конкретного проекта кроме этих элементов необходимо задать также и вектора профиля использования нескладируемых ресурсов ($n = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$) и объемов реализуемых в проекте процессов ($V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$).

Успешная реализация проекта определяется системой равенств:

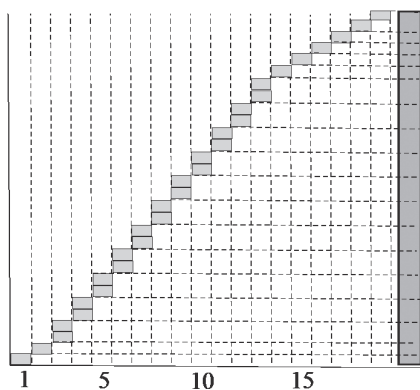


Рис. 1². Графический образ успешной реализации отдельного процесса системы (1)

$$\sum_{i=\min}^{i=\max} \sum_{\alpha=1}^{A_{i,j}} w_{j,\alpha} \cdot n_{i,\alpha} = v_j; \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (1)$$

отражающей полное выполнение всех предусмотренных планом процессов. Внутренняя сумма в каждом уравнении системы (1) описывает выполнения j -того процесса в i -тый промежуток планирования (далее – ПП) при использовании нескладируемых ресурсов, номенклатура которых определяет число членов суммы $A_{i,j}$. Внешняя сумма в уравнениях системы (1) описывает накопление объемов каждого из j запланированных процессов за время его реализации от начального ПП ($i=i_{\min}$) до окончания ($i=i_{\max}$). Графически отдельное уравнение системы (1) для базового плана отражено на рисунке 1, а для двух сценариев реализации процесса в условиях стохастических воздействий – на рисунках 2 и 3.

На рисунке 1 по оси абсцисс отложены номера промежуточных планирования; по оси ординат – объемы реализованных частей процесса. Высоты прямоугольников с заливкой отражают мощность отдельного ресурса $w_{j,\alpha}$, а его площадь – выработку ресурса за один ПП. Количество прямоугольников определяет профиль ресурса $n_{i,\alpha}$. Сумма высот для каждого ПП отражает внутреннюю сумму уравнения (1) равную $\sum_{\alpha=1}^{A_{i,j}} w_{j,\alpha} \cdot n_{i,\alpha}$. Площадь прямоугольника в правой части рисунка пропорциональна полному объему процесса v_j . Нумерация ПП на оси абсцисс стартует от начального значения ($i=i_{\min}$).

Плановый профиль ресурса предусматривает периоды перебазирующего ресурса на объект (первые два ПП) и его высвобождение во второй половине активного периода (ПП с номерами от 14 до 20). Наиболее активное освоение фронта работ происходит в ПП с номерами от 3 до 13. При этом внутри каждого из этих периодов профиль остается постоянным. Однако внешние стохастические воздействия могут значительно уменьшить равномерность активности ресурса и, более того, привести к необходимости использования менее эффективных для данного процесса ресурсов, что наглядно видно из рисунка 2.

На рисунке 2а наглядно видны промежутки, в которых используется ресурс только одного вида (ПП от № 1 до № 18)

² Все рисунки выполнены авторами статьи.

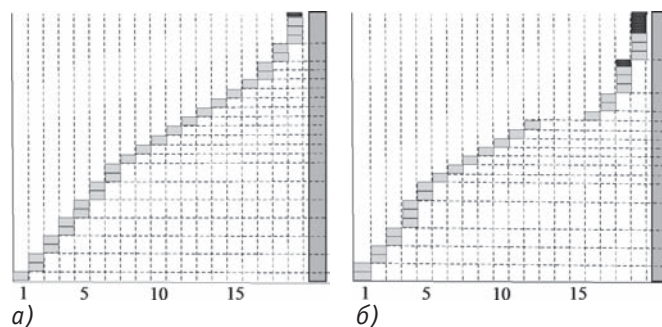


Рис. 2. Сценарий реализации плана в условиях: а) умеренных стохастических воздействий; б) в условиях стохастических воздействий

и последний активный промежуток, в котором для выполнения планового задания был подключён второй ресурс (графически – прямоугольник с более плотной заливкой). Производительность непрофильного ресурса меньше, чем у основного, что отражает меньшая высота соответствующего прямоугольника.

На рисунке 2 б представлен сценарий реализации плана в условиях интенсивных стохастических воздействий, которые в ПП с номерами от 6 до 12 значительно замедлили реализацию процесса, а в ПП с номерами от 13 до 15 полностью останавливают процесс. В связи с этим в последний активный период были использованы шесть единиц непрофильного ресурса. Такое состояние профиля активности нескладированных ресурсов позволило реализовать процесс в плановые сроки.

Как проактивное, так и реактивное планирование должны учитывать наличие полного набора складированных ресурсов и технологические взаимосвязи реализуемых процессов. При этом количество складированных ресурсов определяет возможность выполнения процессов, а технологические связи определяют также и динамику реализации проекта. Количественное описание технологических связей процессов требует на первом этапе определения цепочек упорядоченных по времени взаимосвязанных процессов. Графически альтернативные методы упорядочения изображены на рисунке 3.

На рисунке 3 процессы разбиты на N слоёв так, что процессы предыдущего слоя (процессы-доноры) порождают фронты работ для процессов-акцепторов, локализованных в последующих слоях. Соответствующие технологические связи отражены стрелками. Так, например, на рисунке 4 единственный процесс первого слоя $\{1;1\}$ порождает фронты работ для всех процессов второго слоя – процессы $\{2;1\}$, $\{2;2\}$, $\{2;3\}$ и одного процесса третьего слоя – процесса $\{3;4\}$. Примером такой взаимосвязи может служить последовательность работ, стартующих с черновой штукатурки стен, порождающей фронт работ для укладки керамической плитки, покраски поверхности и поклейки обоев и т.п. При этом для части по-

верхности стен уже на основе черновой отделки, минуя этап чистовой отделки, возможен монтаж оборудования.

Алгоритм построения дерева процессов методом прямого распространения (см. рис. 3 а) стартует с базового процесса-донора $\{1;1\}$ и описывает все технологические взаимосвязи всех цепочек процессов-акцепторов. Возможен и алгоритм обратного распространения (рис. 3 б), в котором на начальном этапе определяется конечная цель технологической цепочки $\{N;1\}$ и далее определяются наборы предшествующих процессов, выполнение которых открывает фронт для связанных с ними работ – акцепторов. Вне зависимости от метода построения полный набор деревьев процессов представляет собой объединение множеств для всех стартовых – для прямого распространения, или финишных – для обратного распространения, процессов.

Дерево процессов позволяет лишь качественно описать ход реализации проекта. Количественное описание сценариев реализации календарного плана требует также задания матрицы коэффициентов взаимосвязи процессов-доноров процессов-акцепторов, элементы которой для каждой технологически связанной пары определяются следующей формулой:

$$d_{\{N_D, i_D\}, \{N_A, i_A\}} = \frac{F_{\{N_A, i_A\}}}{v_{\{N_D, i_D\}}} \quad (2)$$

Здесь $v_{\{N_D, i_D\}}$ – объём процесса-донора, $F_{\{N_A, i_A\}}$ – порождаемый фронт процесса-акцептора. Нумерация процессов в зависимости от метода построения дерева соответствует рисунку 3. Графически технологические взаимосвязи с учётом значений коэффициентов $d_{\{N_D, i_D\}, \{N_A, i_A\}}$ отражены на рисунке 4.

На рисунке 6 нотация процессов совпадает с таковой на рисунке 3. Толщина стрелок пропорциональна значениям коэффициентов $d_{\{N_D, i_D\}, \{N_A, i_A\}}$. На рисунке 4 наглядно видна технологическая взаимосвязь процесса $\{1;1\}$ со всеми процессами последующих слоёв. В противоположность этому процесс $\{2;3\}$ определяет фронт работ лишь для одного по-

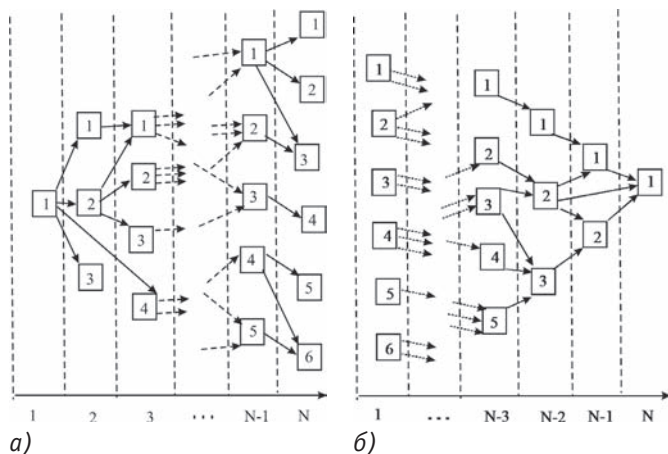


Рис. 3. Упорядочение технологических процессов методом: а) прямого распространения; б) методом обратного распространения

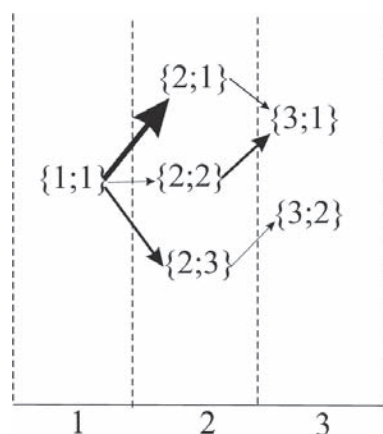


Рис. 4. Графическое представление элементов матрицы коэффициентов взаимосвязи для участка дерева процессов

следующего процесса, однако цепочка $\{1; 1\} \rightarrow \{2; 3\} \rightarrow \{3; 2\}$ является единственной технологической последовательностью, порождающей фронт работы $\{3; 2\}$. Отклонения от графика работ на любом этапе этой последовательности не может быть компенсировано за счёт использования альтернативных нескладируемых ресурсов, вследствие чего данная ветвь дерева процессов должна привлечь большое внимание как при проактивном, так и при реактивном планировании, даже если она не находится на критическом пути.

Количественно описать динамику технологических взаимосвязей позволяет вектор текущего объёма процесса $v(i)$, компоненты которого определяются следующей формулой:

$$v_j(i) = \sum_{i_{\min}}^i \sum_{\alpha=1}^{A_{i,j}} w_{j,\alpha} \cdot n_{i,\alpha} . \quad (3)$$

В выражении (3) переменная $i_{\min} \leq i \leq i_{\max}$ нумерует промежутки планирования, в которые реализуется j -тый процесс. Учитывая определение коэффициентов взаимосвязи (2) и формулу (3), выразим фронт работ в $(i+1)$ -ый промежуток планирования в следующем виде:

$$F_{\{N_A, i_A\}} = F_{\{0,0\}} + \sum_{\{N_D, i_D\}} v_{\{N_D, i_D\}} \cdot d_{\{N_D, i_D\}, \{N_A, i_A\}} . \quad (4)$$

В формуле (4) суммирование осуществляется по всем процессам-донорам, технологически связанным с процессом $\{N_A, i_A\}$ и имеющим ненулевое значение объёма, реализованного в i -тый промежуток планирования, а слагаемое $F_{\{0,0\}}$ есть исходный фронт соответствующего процесса. Технологическая возможность реализации объёма $v_j(i)$ -того процесса в $(i+1)$ -ый промежуток планирования определяется следующей системой неравенств:

$$v_j(i+1) \leq F_j(i); \quad i+1 \leq i_{\max} \quad (5)$$

для всех запланированных в $(i+1)$ -ый промежуток процессов. Графически условие (5) иллюстрирует рисунок 5.

На рисунке 5 по оси абсцисс отложены номера промежутков планирования; высоты прямоугольников с заливкой различной плотности пропорциональны мощностям активных

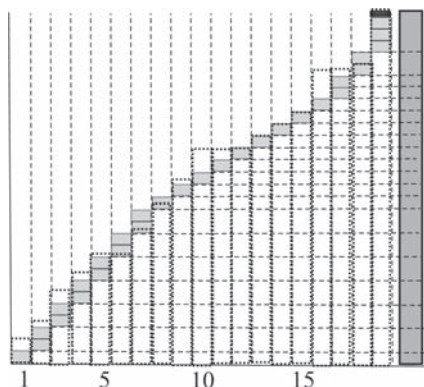


Рис. 5. Влияние технологических взаимосвязей на динамику реализации реактивного календарного плана

нескладируемых ресурсов, а их количество в каждом ПП графически описывает профиль ресурсов. Прямоугольник в правой части рисунка пунктирными линиями разделён на части, графически отражающие динамику накопления объёма реализованного процесса, а его высота пропорциональна полному объёму процесса. Высоты прямоугольников с точечными границами пропорциональны фронту процесса $F\{N_A, i_A\}$ (4).

На диаграмме (рис. 5) наглядно видны следующие периоды реализации процесса:

- 1) начальный период технологической возможности реализации процесса – (ПП 1–5);
- 2) период технологической невозможности плановой реализации процесса вследствие недостаточности фронта – ПП (6–8);
- 3) период опережающего создания фронта – ПП (9–11);
- 4) период полного освоения фронта – ПП (12–15);
- 5) период технологической нестабильности – ПП (16–20).

Таким образом, анализ выполнения условий (1) и (5) свидетельствует о необходимости корректировки проактивного календарного плана.

Заключение

Методы оптимального планирования строительных проектов в условиях ресурсных ограничений привлекают значительный интерес исследователей и практиков. Ограниченность области практического применения детерминированных подходов стимулировала исследования стохастических систем как в рамках чисто реактивного, так и в рамках проактивно-реактивного планирования при учёте неопределённости продолжительности процессов.

Новые перспективы открывают методы расчёта динамики реализации проекта, детерминированная часть которого основана на объективных характеристиках нескладируемых ресурсов, а стохастические воздействия изменяют профиль их использования и производительность. Перспективным является также подход, основанный на интеграции алгоритмов априорного планирования, динамического мониторинга и корректировки результатов реализации проекта. Реализация такого подхода требует разработки алгоритмов моделирования сценариев реализации проекта в условиях интенсивных стохастических воздействий на базе иерархического формирования векторных характеристик нескладируемых ресурсов и матриц мощностей и фронтов работ. Технологические взаимосвязи описывает дерево процессов, построение ветвей которого может быть реализовано методами прямого и обратного распространения. Количественное описание динамики реализации календарного плана требует также задания коэффициентов взаимосвязи для всех ветвей дерева процессов. На этой основе могут быть оптимизированы методы реализации всех процессов проекта и динамики технологических взаимосвязей. Такой подход даёт возможность оптимизировать управленческие решения, обеспечивающие своевременное завершение технологически связанных про-

цессов. Такие решения могут быть реализованы только при согласованной корректировке динамики реализации процессов в рамках реактивного планирования.

Развитие предложенных в данной работе алгоритмов предполагает программную реализацию в оболочке реляционной базы управления данными и моделирование на этой основе динамики конкретных строительных проектов различного масштаба, реализуемых в условиях стохастических воздействий.

Список источников

1. Батяева, А.Е. Обеспеченность промышленных предприятий производственными и трудовыми ресурсами: последствия отклонения от «идеального баланса» / А.Е. Батяева. – DOI: 10.20542/2307-0390-2020-3-3-15. – Текст : электронный // Российский экономический барометр. – 2020. – № 3 (79). – С. 3–15. – URL: <https://doi.org/10.20542/2307-0390-2020-3-3-15> (дата обращения 29.07.2025).
2. Dobrosotskikh, M.G. Improvement the Scheduling Based on the Reducing of the Dimensionality of the System / M.G. Dobrosotskikh, V.Ya. Mishchenko, M.A. Preobrazhenskii. – DOI:10.1088/1757-899X/481/1/012029. – Текст : электронный // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2019. – № 481 (1). – P. 012029. – URL: <https://clck.ru/3NMyyv> (дата обращения 29.07.2025).
3. Peng, W. Critical Chain Based Proactive-Reactive Scheduling for Resource-Constrained Project Scheduling under Uncertainty / W. Peng., X. Lin, H. Li. – DOI:10.1016/j.eswa.2022.119188. – Текст : электронный // Expert Systems with Applications. – 2022. – № 214. – P. 119188. – URL: <https://clck.ru/3NMty7> (дата обращения 29.07.2025).
4. Herroelen, W. Project Scheduling under Uncertainty: Survey and Research Potentials / W. Herroelen, R. Leus. – DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.002. – Текст : электронный // European Journal of Operational Research. – 2005. – № 165 (2). – P. 289–306. – URL: <https://clck.ru/3NMumc> (дата обращения 29.07.2025).
5. Li, H. Solving Stochastic resource-Constrained Project Scheduling Problems by Closed-Loop Approximate Dynamic Programming / H. Li, K. Womer. – DOI:10.1016/j.ejor.2015.04.015. – Текст : электронный // European Journal of Operational Research. – 2015. – № 246 (1). – URL: <https://clck.ru/3NMuW> (дата обращения 29.07.2025).
6. Chen, L. A Two-Stage Resource-Constrained Project Scheduling Model with Proactive and Reactive Strategies Under Uncertainty / L. Chen, Z. Zhang. – DOI:10.1007/978-3-642-55122-2_120. – Текст : электронный // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2014. – № 281. – P. 1397–1407. – URL: <https://clck.ru/3NMvLC> (дата обращения 29.07.2025).
7. Ding, H. Extensions of the Resource-Constrained Project Scheduling Problem / H. Ding, C. Zhuang, J. Liu. – DOI:10.1016/j.autcon.2023.104958. – Текст : электронный // Automation in Construction. – 2023. – № 153 (14). – P. 104958. – URL: <https://clck.ru/3NMvT5> (дата обращения 29.07.2025).
8. Dauzère-Pérès S. Multi-Resource Shop Scheduling with Resource Flexibility / S. Dauzère-Pérès, W. Roux, J.B. Lasserre. – Текст : электронный // European Journal of Operational Research. – 1998. – № 107 (2). – P. 289–305. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00341-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00341-X) (дата обращения 29.07.2025).
9. Davari, M. Exact Algorithms for a Single-Machine Scheduling Problem with Time Windows and Precedence Constraints / M. Davari, E. Demeulemeester, R. Leus, and F. Talla Nobibon. – DOI: 10.1007/s10951-015-0428-y. – Текст : электронный // Journal of Scheduling. – 2016. – № 19 (3). – P. 309–334. – URL: <https://clck.ru/3NMvmt> (дата обращения 29.07.2025).
10. Мищенко, В.Я. NP-разрешимая задача календарного планирования строительства, реконструкции и ремонта объектов / В.Я. Мищенко, М.Г. Добросоцких. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 6 (366). – С. 13–20.
11. Choi, J. Dynamic Programming in a Heuristically Confined State Space: a Stochastic Resource-Constrained Project Scheduling Application / J. Choi, M. Realff Jay H. Lee. – DOI: 10.1016/j.compchemeng.2003.09.024. – Текст : электронный // Computers & Chemical Engineering. – 2004. – № 28 (6). – P. 1039–1058. – URL: <https://clck.ru/3NMzcg> (дата обращения 29.07.2025).
12. Rahman, H.F. Scheduling Project with Stochastic Durations and Time-Varying Resource Requests: A Metaheuristic Approach / H.F. Rahman, R.K. Chakraborty, M.J. Ryan. – DOI:10.1016/j.cie.2021.107363. – Текст : электронный // Computers & Industrial Engineering. – 2021. – № 157. – P. 107363. – URL: <https://clck.ru/3NMwRK> (дата обращения 29.07.2025).
13. Zhi, Ch. Efficient Priority Rules for the stochastic Resource-Constrained Project Scheduling Problem / Ch. Zhi, E. Demeulemeester, S. Bai, Y. Guo. – DOI:10.1016/j.ejor.2018.04.025. – Текст : электронный // European Journal of Operational Research. – 2018. – № 270 (3). – P. 957–967. – URL: <https://clck.ru/3NMzk2> (дата обращения 29.07.2025).
14. Fahmy, A. Improving RCPSP Solutions Quality with Stacking Justification – Application with Particle Swarm Optimization / A. Fahmy, T.M. Hassan, H.A. Bassioni. – DOI:10.1016/j.eswa.2014.03.027. – Текст : электронный // Expert Systems with Applications. – 2014. – № 41 (13). – P. 5870–5881. – URL: <https://clck.ru/3NMwRZ> (дата обращения 29.07.2025).
15. Tao, Sh. Stochastic Project Scheduling with Hierarchical Alternatives / Sh. Tao, Ch. Wu, Zh. Sheng, X. Wang. – DOI:10.1016/j.apm.2017.09.015. – Текст : электронный // Applied Mathematical Modelling. – 2017. – № 58(4). – P. 181–202. – URL: <https://clck.ru/3NMwRZ> (дата обращения 29.07.2025).
16. Brčić, M. Planning Horizons Based Proactive Rescheduling for Stochastic Resource-Constrained Project Scheduling Problems / M. Brčić, M. Katić, N. Hlupić. – DOI: 10.1016/j.

ejor.2018.07.037. – Текст : электронный // *European Journal of Operational Research*. – 2019. – № 273(1). – P. 58–66. – URL: <https://clck.ru/3NMx6r> (дата обращения 29.07.2025).

17. Artigues, Ch. A Polynomial Activity Insertion Algorithm in a Multi-Resource Schedule with Cumulative Constraints and Multiple Modes / Ch. Artigues, F. Roubellat. – DOI:10.1016/S0377-2217(99)00496-8. – Текст : электронный // *European Journal of Operational Research*. – 2000. – № 127(2). – P. 297–316. – DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00496-8. – URL: <https://clck.ru/3NMxCx> (дата обращения 29.07.2025).

18. Hu, X. Incorporation of Activity Sensitivity Measures into Buffer Management to Manage Project Schedule Risk / X. Hu, N. Cui, E. Demeulemeester, B. Li. – DOI:10.1016/j.ejor.2015.08.066. – Текст : электронный // *European Journal of Operational Research*. – 2015. – № 249 (2). – P. 717–727. – URL: <https://clck.ru/3NMxWU> (дата обращения 29.07.2025).

19. Schatteman, D. A Methodology for Integrated risk Management and Proactive Scheduling Of Construction Projects / D. Schatteman, W. Herroelen, S. Van de Vonder, A. Boone. – DOI:10.2139/ssrn.950903. – Текст : электронный // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2008. – № 134. – URL: <https://clck.ru/3NMxKE> (дата обращения 29.07.2025).

20. Mishchenko, V.Ya. Dynamics of Technical and Technological Processes in Construction under Conditions Of Stochastic Impacts / V.Ya. Mishchenko, Ye.P. Gorbaneva, M.A. Preobrazhensky, A.V. Bukhtoyarov. – DOI 10.36622/2542-0526.2024.62.2.007. – Текст : электронный // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. – 2024. – № 2 (62). – P. 70–82.

21. Султанова, И.П. Анализ методов планирования, управления и разработки организационно-технологических решений в проектах капитального строительства / И.П. Султанова // *Вестник МГСУ*. – 2015. – № 7. – С. 127–136.

References

1. Batyaeva, A.E. Obespechennost' promyshlennykh predpriyatii proizvodstvennymi i trudovymi resursami: posledstviya otkloneniya ot «ideal'nogo balansa» [Sufficiency of Industrial Enterprises with Production and Labor Resources: Consequences of Deviation from the “Perfect Balance”]. In: *Rossiiskii ekonomicheskii barometr [Russian Economic Barometer]*, 2020, no. 3 (79), pp. 3–15. DOI: 10.20542/2307-0390-2020-3-3-15. (In Russ., abstr. in Engl.)

2. Dobrosotskikh M.G., Mishchenko V.Ya., Preobrazhenskii M.A. Improvement the Scheduling Based on the Reducing of the Dimensionality of the System. In: *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, 481 (1), p. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012029. URL: <https://clck.ru/3NMMyvw> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

3. Peng W., Lin X., Li H. Critical Chain Based Proactive-Reactive Scheduling for Resource-Constrained Project Scheduling under Uncertainty. In: *Expert Systems with Applications*, 2022, no. 214, p. 119188. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119188. URL: <https://clck.ru/3NMty7> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

4. Herroelen W., Leus R. Project Scheduling under Uncertainty: Survey and Research Potentials. In: *European Journal of Operational Research*, 2005, no. 165 (2), pp. 289–306. DOI:10.1016/j.ejor.2004.04.002. URL: <https://clck.ru/3NMumc> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

5. Li H., Womer K. Solving Stochastic resource-Constrained Project Scheduling Problems by Closed-Loop Approximate Dynamic Programming. In: *European Journal of Operational Research*, 2015, no. 246 (1). DOI:10.1016/j.ejor.2015.04.015. URL: <https://clck.ru/3NMuWE> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

6. Chen L., Zhang Z. A Two-Stage Resource-Constrained Project Scheduling Model with Proactive and Reactive Strategies Under Uncertainty. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2014, no. 281, pp. 397–1407. DOI:10.1007/978-3-642-55122-2_120. URL: <https://clck.ru/3NMvLC> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

7. Ding H., Zhuang C., Liu J. Extensions of the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. In: *Automation in Construction*, 2023, no. 153 (14), p. 104958. DOI:10.1016/j.autcon.2023.104958. URL: <https://clck.ru/3NMvT5> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

8. Dauzère-Pérès S., Roux W., Lasserre J.B. Multi-Resource Shop Scheduling with Resource Flexibility. In: *European Journal of Operational Research*, 1998, no. 107 (2), pp. 289–305. URL: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00341-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00341-X) (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

9. Davari M., Demeulemeester E., Leus R., and Nobibon F. T. Exact Algorithms for a Single-Machine Scheduling Problem with Time Windows and Precedence Constraints. In: *Journal of Scheduling*, 2016, no. 19 (3), pp. 309–334. DOI:10.1007/s10951-015-0428-y. URL: <https://clck.ru/3NMvmu> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

10. Mishchenko V.Ya., Dobrosotskikh M.G. Mishchenko V.Ya., Dobrosotskikh M.G. NP-razreshimaya zadacha kalendarного planirovaniya stroitel'stva, rekonstruktsii i remonta ob'ektov [NP Solvable Task of Scheduling of Construction, Reconstruction and Repair of Objects]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti [Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology]*, 2016, no. 6 (366), pp. 13–20. (In Russ.)

11. Choi J., Realff M., Lee Jay H. Dynamic Programming in a Heuristically Confined State Space: a Stochastic Resource-Constrained Project Scheduling Application. In: *Computers & Chemical Engineering*, 2004, no. 28 (6), pp. 1039–1058. DOI:10.1016/j.compchemeng.2003.09.024. URL: <https://clck.ru/3NMzcq> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

12. Rahman H.F., Chakraborty R.K., Ryan M.J. Project with Stochastic Durations and Time-Varying Resource Requests: A Metaheuristic Approach. In: *Computers & Industrial Engineering*, 2021, no. 157, p. 107363. DOI:10.1016/j.cie.2021.107363. URL: <https://clck.ru/3NMwRK> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

13. Zhi Ch., Demeulemeester E., Bai S., Guo Y. Efficient Priority Rules for the stochastic Resource-Constrained Project

Scheduling Problem. In: *European Journal of Operational Research*, 2018, 270(3):957–967. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.04.025. URL: <https://clck.ru/3NMzk2> (дата обращения 29.07.2025). (In Engl.)

14. Fahmy A., Hassan T.M., Bassioni H.A. Improving RCPSP Solutions Quality with Stacking Justification – Application with Particle Swarm Optimization. In: *Expert Systems with Applications*, 2014, no. 41 (13), pp. 5870–5881. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.03.027. URL: <https://clck.ru/3NMwrZ> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

15. Tao Sh., Wu Ch., Sheng Zh., Wang X. Stochastic Project Scheduling with Hierarchical Alternatives. In: *Applied Mathematical Modelling*, 2017, no. 58(4), pp. 181–202. DOI:10.1016/j.apm.2017.09.015. URL: <https://clck.ru/3NMwrZ> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

16. Brčić M., Katić M., Hlupić N. Planning Horizons Based Proactive Rescheduling for Stochastic Resource-Constrained Project Scheduling Problems. In: *European Journal of Operational Research*, 2019, no. 273 (1), pp. 58–66. DOI:10.1016/j.ejor.2018.07.037. URL: <https://clck.ru/> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

17. Artigues Ch., Roubellat F. A Polynomial Activity Insertion Algorithm in a Multi-Resource Schedule with Cumulative Constraints and Multiple Modes. In: *European Journal of Operational Research*, 2000, no. 127 (2), pp. 297–316. DOI:10.1016/S0377-2217(99)00496-8. URL: <https://clck.ru/3NMxCx> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

18. Hu X., Cui N., Demeulemeester E., Li B. Incorporation of Activity Sensitivity Measures into Buffer Management to Manage Project Schedule Risk. In: *European Journal of Operational Research*, 2015, no. 249 (2), pp. 717–727. DOI:10.1016/j.ejor.2015.08.066. URL: <https://clck.ru/3NMxWU> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

19. Schatteman D., Herroelen W., S. Van de Vonder, Boone A. Methodology for Integrated risk Management and Proactive Scheduling Of Construction Projects. In: *Journal of Construction Engineering and Management*, 2008, no. 134. DOI:10.2139/ssrn.950903. URL: <https://clck.ru/3NMxKE> (Accessed 07/29/2025). (In Engl.)

20. Mishchenko V.Ya., Gorbaneva Ye.P., Preobrazhensky M.A., Bukhtoyarov A.V. Dynamics of Technical and Technological Processes in Construction under Conditions Of Stochastic Impacts. In: *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2024, no. 2 (62), pp. 70–82. DOI 10.36622/2542-0526.2024.62.2.007. (In Engl.)

21. Sultanova, I.P. Analiz metodov planirovaniya, upravleniya i razrabotki organizatsionno-tekhnologicheskikh reshenii v proektakh kapital'nogo stroitel'stva [Analysis of Planning, Management and Development Methods of Organizational and Technological Solutions in Infrastructure Projects]. In: *Vestnik MGSU*, 2015, no. 7, pp. 127–136. (In Russ., abstr. In Engl.)