Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

А.С. Антонова, К.А. Аксенов

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
И ПЛАНИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ
НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА**

Монография

Москва
2021

УДК 004.94

ББК 32.81

А42

Рецензенты:

Стариков Е.Н. — канд. экон. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой Шахматного искусства и компьютерной математики (УрГЭУ, г. Екатеринбург);

Спицина И.А. — канд. техн. наук, доцент департамента Информационных технологий и автоматики (УрФУ, г. Екатеринбург).

А42 Антонова А.С., Аксенов К.А.

Применение методов принятия решений и планирования бизнес-процессов на основе мультиагентного подхода: монография / А.С. Антонова, К.А. Аксенов. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2021. — 94 с.

ISBN 978-5-91327-712-1

DOI 10.17513/np.502

Книга содержит описание разработки и применения гибридного метода планирования бизнес-процессов в условиях неполноты исходной информации и многокритериальности целевой функции. Предложенные метод и информационная технология планирования основаны на использовании мультиагентного подхода, интегрированного с численными методами снятия неполноты входной информации. Разработанные мультиагентные модели технологических, логистических и организационных процессов и предложенный метод планирования могут быть использованы в области управления производством и организации логистических цепочек движения единиц продукции. Данная книга рекомендуется студентам и аспирантам технических вузов, руководителям производственных отделов для ознакомления с теоретическими и практическими аспектами реализации систем поддержки принятия решений в сфере планирования бизнес-процессов.

Библиогр.: 83 назв. Табл. 14. Рис. 30.

ISBN 978-5-91327-712-1

© Антонова А.С., Аксенов К.А., 2021

© ИД «Академия Естествознания»

© АНО «Академия Естествознания»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ПЛАНИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ	7
1.1 Задача планирования бизнес-процессов и неполнота исходной информации.....	7
1.2 Классические методы планирования	9
1.3 Гибридные методы планирования	11
1.4 Методы стохастического планирования	16
1.5 Выводы	18
2 МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	20
2.1 Требования к методу планирования.....	20
2.2 Постановка задачи планирования работ в условиях неполноты исходной информации	21
2.3 Разработка метода планирования работ в условиях неполноты исходной информации	24
2.4 Сравнительный анализ нового метода планирования и существующих методов	32
2.5 Выводы	37
3 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И ПЛАНИРОВАНИЯ.....	38
3.1 Задача планирования проектных работ в условиях неполноты исходной информации	38
3.2 Задача совершенствования организационных процессов телекоммуникационного сопровождения цехов прокатки металлургического предприятия.....	48
3.3 Задача планирования подачи плавок на устройство непрерывного литья заготовок	52
3.4 Планирование процесса управления кранами на конвертерном производстве	56

3.5 Планирование логистических процессов электросталеплавильного цеха.....	63
3.6 Планирование логистических процессов конвертерного производства.....	70
3.7 Планирование логистических процессов цехов горячей и холодной прокатки.....	76
3.8 Выводы	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	84
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	85

ВВЕДЕНИЕ

Книга посвящена вопросам поддержки принятия решений при планировании процессов в условиях неполноты исходной информации и многокритериальности целевой функции. Рассматривается задача планирования, обладающая следующими особенностями: использованием складываемых и нескладываемых ресурсов для выполнения операций, привлечением субподрядных нескладываемых ресурсов в случае нехватки собственных, наличием временных ограничений на выполнение операций, присутствием неполноты исходной информации, связанной с количеством выполняемых проектов на горизонте планирования, анализом многокритериальности целевой функции планирования.

К нескладываемым ресурсам относятся ресурсы, которые допускают повторное использование, например оборудование, рабочий персонал. К складываемым относятся ресурсы, которые полностью расходуются в указанном объеме в процессе выполнения операции, например сырье и материалы, финансы.

К основным трудностям, с которыми сталкивается при планировании лицо, принимающее решения (ЛПР), относятся сокращение времени принятия решения, многокритериальность задачи выбора одного из альтернативных решений и неполнота исходной информации. Неполнота исходной информации может приводить к тому, что запланированное расписание или реорганизация процессов при реализации в реальной жизни под воздействием неучтенных внешних событий становятся неэффективными, а порой и неосуществимыми. Таким образом, при планировании процессов, ЛПР необходимо рассматривать альтернативные сценарии, учитывающие как различное поведение внешней среды, так и возможные структурные и параметрические преобразования изучаемой системы.

Актуальной задачей является разработка метода и информационной технологии планирования с учетом неполноты исходной информации и многокритериальности задачи планирования.

Задача календарного планирования относится к классу задач, изучаемых в рамках теории расписаний и сетевого планирования. Развитием данных направлений науки занимались отечественные

и зарубежные ученые: Гимади Э. Х., Гончаров Е. Н., Канев В. С., Мезенцев Ю. А., Севастьянов С. В., Танаев В. С., Шкурба В. В., Clark C. E., Graham R. L., Kannan R., Kolisch R., Pinedo M., и др.

Применение к задаче планирования эвристических методов, включая мультиагентное моделирование, рассмотрено в работах Емельянова В. В., Курейчика В. В., Скобелева П. О., Alvandi S., Biruk S., Guizzi G., Istokovic D. и др. При этом в научных публикациях по теме исследования задаче учета неполноты исходной информации не уделено должного внимания.

Одним из решений поставленной задачи является применение концепции системного моделирования, под которым подразумевается многокритериальное описание и исследование заданной предметной области с использованием комбинированных методов моделирования.

Таким образом, разработка метода и компьютерной технологии планирования с учетом неполноты исходной информации и многокритериальности целевой функции на основе гибридного эвристического метода представляет научный и практический интерес.

Идея книги заключается в применении для решения задачи планирования следующих моделей: имитационной, мультиагентной, экспертной, эволюционной моделей и численных методов снятия многокритериальности и неполноты исходной информации.

Структура материала книги выглядит следующим образом.

Книга состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

В первой главе книги обоснована необходимость учета неполноты исходной информации в условиях ресурсных и временных ограничений при планировании работ, приведен обзор методов планирования.

Во второй главе излагается новый метод планирования в условиях неполноты исходной информации и многокритериальности целевой функции задачи планирования. Приведен сравнительный анализ предложенного метода и существующих методов планирования.

В третьей главе приведены примеры решения практических задач планирования с использованием нового метода и разработанной на его основе информационной технологии. Примеры включают описание разработанных мультиагентных моделей исследуемых процессов.

1 ПЛАНИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

1.1 Задача планирования бизнес-процессов и неполнота исходной информации

Задача планирования бизнес-процессов является одной из ключевых задач управления проектами. К задачам планирования относятся задача календарного планирования, задача распределения ресурсов по работам и задача финансового планирования проекта.

Выделим ряд особенностей задачи планирования бизнес-процессов в условиях неполноты исходной информации.

1. Многокритериальность задачи планирования.

В условиях конкуренции между предприятиями планирование необходимо проводить с учетом различных критериев оптимальности согласно текущим рыночным потребностям. Важное значение приобретают экономические и производственные критерии, связанные с максимизацией прибыли, минимизацией затрат, минимизацией штрафов за опережение и запаздывание относительно директивных сроков, выполнения заказов «точно в срок», с учетом различных ограничений, таких как временные ограничения, ограничения предшествования и доступности ресурсов.

Основными критериями планирования в условиях рыночной экономики являются следующие [1]:

- 1.1. выполнение заказов точно в срок;
- 1.2. минимизация суммарного взвешенного запаздывания заданий относительно директивных сроков;
- 1.3. минимизация суммарного взвешенного момента выполнения заданий;
- 1.4. минимизация суммарного штрафа, как за опережение, так и за запаздывание заданий относительно директивных сроков;
- 1.5. минимизация длины расписания (момента окончания выполнения последнего задания);
- 1.6. минимизация стоимости привлекаемых субподрядных ресурсов;
- 1.7. сглаживание функции потребления собственных ресурсов.

2. Наличие ограничений задачи планирования.

Исследователи выделяют пять типов ограничений, накладываемых на формируемый календарный план работ [2]: ресурсное, предшествования, физического размещения, информационное и ограничение на время выполнения.

3. Неполнота исходной информации, применяемой при планировании.

В последние годы множество работ посвящено проблеме стохастического планирования работ в условиях неполноты исходной информации. Исследователи анализируют параметрическую неполноту процессов планирования, связанную со стохастическим заданием количества доступных нескладируемых ресурсов и функции потребления ресурсов [3,4], стохастическим описанием стоимости операций [5] и неполнотой сведений относительно длительности выполнения операций [3,6-10]. Также существуют работы, изучающие структурную неполноту исходной информации планирования, связанную со стохастическим заданием количества операций в портфеле проектов (числа выполняемых проектов) [4,7,11-12].

4. Оптимизационный характер задачи планирования.

Задача планирования работ по портфелю проектов относится к классу многокритериальных задач управления сложными системами, время поиска решений которых растет экспоненциально в зависимости от размерности задачи [13]. С учетом данного обстоятельства, применение комбинаторных методов, а также математического программирования к решению задачи планирования не оправдано, поскольку связано с длительностью вычислений при исследовании задач большой размерности. Так, для метода ветвей и границ сходимость метода ограничена задачами планирования с числом работ менее 50 [11].

Следует также отметить, что в существующих исследованиях [3,8-10,13,15-34] не рассматривается оптимизация привлекаемых субподрядных работ, в то время как данная задача является актуальной как для проектных организаций, так и для предприятий с серийным производством.

Рассмотрим задачу планирования работ с учетом неполноты исходной информации и наличия временных и ресурсных ограничений. В качестве временных ограничений выступают ограничения раннего и позднего начала работ. Неполнота исходной информации для рассматриваемой задачи связана с возможностью появления в ходе выполне-

ния календарного плана работ дополнительных проектов, требующих ресурсных затрат.

1.2 Классические методы планирования

Классическими методами календарного планирования работ являются методы теории расписаний [29-34] и методы сетевого планирования [7,11].

Одной из наиболее близких задач, изучаемых в рамках теории расписаний, является задача оптимизации расписаний параллельной системы с идентичными приборами при наличии задержек начала обслуживания заявок. Данная задача согласно нотации Грэхема записывается следующим образом: $Pm/r_j/C_{max}$. Здесь Pm означает наличие в системе ограниченного числа параллельных идентичных приборов с одинаковым временем обработки заявки, r_j указывает на наличие задержек начала обслуживания заявок, ограничения предшествования-следования для заявок не заданы, прерывания в системе не допускаются, C_{max} представляет собой критерий оптимизации, связанный с минимизацией времени окончания работы всей рассматриваемой системы.

Решение указанной задачи с помощью динамического программирования приводит к полному перебору всех допустимых вариантов, число которых оценивается следующим значением: $N = (I^{J+1} - I)/2$, где J – число заявок, I – число приборов [34]. Для указанной задачи Мезенцевым Ю.А. и Эстрайхом И.В. предложен параметрический алгоритм динамического программирования с отсеком вариантов [33-34]. Данный алгоритм предназначен для синтеза расписаний параллельных систем большой размерности за приемлемое время за счет отсева локально наихудших вариантов на каждом шаге работы алгоритма. В результате применения параметрического алгоритма с отсеком вариантов число анализируемых вариантов расписаний снижается до следующего значения: $N' = (I^{k+1} - I)/2 + (J - k + 1)I^k$, где k – параметр алгоритма, задаваемый пользователем и определяющий максимальное число вариантов, оставляемых на каждом этапе работы алгоритма: $K' = I^k$.

В работе [33] было проведено тестирование параметрического алгоритма при решении задачи синтеза расписаний следующей размерности: 5 приборов, 100 заявок. Результаты тестирования подтвер-

дили как быстроедействие параметрического алгоритма по сравнению с базовым алгоритмом динамического программирования, так и близость получаемых с помощью параметрического алгоритма решений к оптимальным решениям (среднее относительное отклонение значений полученных решений составило 0,2 %).

Проведенное исследование [35] показало, что наиболее подходящим алгоритмом, применяемым в теории расписаний для составления расписания в системе с параллельными идентичными приборами, является алгоритм построения расписания с обслуживанием в заданные сроки, предложенный Танаевым В.С. в работе [32]. К факторам, ограничивающим применение данного алгоритма к рассматриваемой задаче планирования работ, относятся следующие: 1) не учитывается возможность сдвига начала выполнения операции в заданных временных рамках; 2) отсутствует поиск оптимального назначения ресурсов на работы с точки зрения минимизации стоимости привлекаемого субподряда. *Кроме того, методы теории расписаний не анализируют неполноту исходной информации и не позволяют находить решение при вероятностном задании параметров планирования.*

Сетевые методы планирования являются наиболее популярными методами календарного планирования работ с ограниченными ресурсами.

Задача построения сетевого графика включает в себя задачу построения технологической карты работ, содержащей сведения о составе работ и их трудоемкости. Путь в сетевом графике — последовательность работ, в которой конечное событие каждой работы совпадает с начальным событием следующей за ней работой. Наиболее продолжительный полный путь в сетевом графике называется критическим. Метод сетевого планирования позволяет рассчитать наиболее раннюю дату завершения проекта и определить критический путь.

Сетевые методы планирования реализованы в популярных компьютерных системах планирования: MS Project и Timeline. Тем не менее, несмотря на широкую распространенность сетевых методов, до сих пор существует ряд проблем, связанных с разработкой эвристических оптимальных методов распределения ресурсов при календарном планировании [11].

Сетевые методы (метод PERT и GERT [7]) позволяют осуществлять поиск решения в условиях неполноты исходной информации относительно длительности работ и числа работ в проекте. Тем не менее,

сетевые методы анализируют ограничения только на нескладируемые ресурсы (персонал, оборудование) и не анализируют ограничения на складируемые ресурсы (материалы, сырье, финансы), что затрудняет их применение для анализа ресурсных ограничений в полном объеме.

1.3 Гибридные методы планирования

В процессе планирования проектных работ ЛПР сталкивается со следующими проблемами: 1) сокращение времени принятия решения; 2) многокритериальность задачи выбора одного из альтернативных решений; 3) неполнота исходной информации. Важную роль при решении данных проблем играет применение методов моделирования, позволяющих повысить оперативность и уровень обоснованности решений, принимаемых ЛПР.

Одним из решений проблем является применение концепции системного (комплексного) моделирования, под которым понимается многокритериальное описание и исследование заданной предметной области с использованием комбинированных методов моделирования, позволяющих обеспечить эффект взаимного усиления достоинств каждой из применяемых моделей. Рассмотрим применение для решения задачи планирования следующих моделей: имитационной, экспертной, мультиагентной и эволюционной моделей.

Имитационная модель предназначена для синтеза структуры, алгоритмов и параметров исследуемой системы, а также для анализа и поиска оптимального варианта системы по некоторым критериям оценки эффективности. Потребность в использовании имитационных моделей для решения задач планирования возникает в силу динамической природы последних, зависимости деятельности системы от как от внешних воздействий (колебания спроса, смена параметров заказа), так и от внутренних воздействий (изменение стратегии распределения ресурсов и средств по работам).

Экспертная системы предназначена для накопления опыта решения задач распределения ресурсов и средств по работам и использования этих знаний (логического вывода) при диагностировании ситуаций и поиске решений. Потребность в использовании экспертных моделей для решения задач планирования работ возникает вследствие отсутствия точных алгоритмов решения планирования в условиях неполноты исходной информации и необходимости применения базы знаний, хранящей сценарии решения подобных задач.

Мультиагентная модель предназначена для решения задачи построения моделей ЛПР. Потребность в использовании мультиагентных моделей при решении задач планирования возникает вследствие присутствия на различных уровнях планирования (стратегическом, тактическом и оперативном) ЛПР, обладающих мотивированным поведением, сотрудничающих друг с другом, имеющих накопленные знания о предметной области и сценариях решения задач управления.

Эволюционная (оптимизационная) модель предназначена для прогнозирования развития ситуации в организационной системе с учетом влияния внешней среды и внутренних факторов. Потребность в использовании эволюционной модели при решении задачи планирования возникает в силу оптимизационного характера задачи и сложности анализируемых процессов, связанной с постоянным обменом системы энергией и информацией с внешней средой, появлением в системе точек бифуркации (разветвления) альтернативных необратимых путей развития.

Остановимся на применении имитационного и эволюционного методов подробнее.

Имитационное моделирование обеспечивает проведение с моделью системы экспериментов путем параметрических и/или структурных изменений модели, что не всегда осуществимо на реальном объекте управления. Имитационная модель обеспечивает аналитика инструментом выработки управляющих воздействий и оценки влияния выработанных воздействий на функционирование системы. Календарное планирование с помощью имитационного моделирования выполняется путем постепенного улучшения начального плана работ с помощью проведения экспериментов с различными входными данными.

Одним из направлений компьютерного моделирования является агентное моделирование. Агенты, независимые сущности модели, взаимодействуют друг с другом для достижения поставленных перед ними целей. Взаимодействие агентов означает установление двусторонних и многосторонних динамических отношений между субъектами. К базовым видам взаимодействия между агентами относятся [36]: кооперация; конкуренция; компромисс; конформизм; уклонение от взаимодействия. Коллективное поведение агентов предполагает кооперацию агентов при решении задач. В процессе работы мультиагентной системы агент может обращаться за помощью к другим агентам, если не в состоянии решить поставленную перед ним задачу самостоятельно. Моделирование коллективного

поведения необходимо также в случаях, когда агенты для решения своих задач используют общий ограниченный ресурс. Идея коллективного поведения агентов при решении задачи планирования получила свое развитие в работах Скобелева П. О. и Клейменовой Е. М. по созданию сети потребностей-возможностей (ПВ-сети) [4,37-41].

Применение имитационного мультиагентного моделирования для решения задачи планирования рассматривается в работах [42-47]. В зависимости от парадигмы, лежащей в основе мультиагентных систем, различают следующие архитектуры систем:

1. Реактивные архитектуры, основанные на моделях типа «стимул-реакция».

2. Делиберативные (интеллектуальные) архитектуры, базирующиеся на принципах и методах работы со знаниями.

3. Гибридные архитектуры, объединяющие в себе первые две.

В настоящее время практически все мультиагентные системы имеют гибридную архитектуру, поддерживающую многоуровневое представление функциональности агента. Основная идея многослойной архитектуры заключается в том, что различные подходы можно сочетать в единой системе благодаря введению архитектурных слоев, каждый из которых решает спектр задач наиболее эффективным способом.

Гибридную архитектуру агента и методы имитационного, экспертного моделирования и моделирования систем массового обслуживания [48-49] реализует модель мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР), разработанная Аксеновым К. А. и Гончаровой Н. В. [50-52].

К недостаткам применения имитационных мультиагентных моделей при решении задачи планирования относится необходимость наличия у аналитика дополнительных сведений о предметной области, облегчающих формирование плана экспериментов и осуществления направленного поиска решения. Альтернативой подобным сведениям является применение эвристических методов направленного поиска, в частности методов эволюционного моделирования.

Самым распространенным эволюционным методом являются генетические алгоритмы. Применение генетической оптимизации при решении задачи планирования широко распространено [2, 13-22, 28, 44-47, 53-54].

В проанализированных исследованиях аналитические методы являются наиболее используемыми, тем не менее, не всегда пред-

ставляется возможным аналитическое описание поведения сложной динамической системы в условиях неопределенности поведения внешней среды и в условиях возможности привлечения дополнительных (субподрядных) ресурсов в случае возникновения узких мест на ресурсах при выполнении плана работ. В этом смысле, наиболее удачным средством оценки функции пригодности решения (календарного плана) является применение имитационной модели, на вход которой подается оцениваемый календарный план, а на выходе формируется оценка функции пригодности.

Методы эволюционного моделирования используют собственную исторически сложившуюся терминологию, сходную с терминологией биологических наук. Соответствие терминов эволюционной модели и математической модели планирования приведено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Соответствие терминов эволюционной и математической моделей

Эволюционная модель	Математическая модель планирования
Хромосома, особь	Решение (календарный план работ)
Ген	Параметр календарного плана работ (ссылка на дату начала отдельной операции)
Аллель	Значение параметра календарного плана работ (дата начала отдельной операции)
Лocus	Номер фрагмента закодированного решения
Генотип	Множество закодированных календарных планов работ, пространство поиска
Фенотип	Множество календарных планов работ, пространство решений
Пригодность, приспособленность	Оптимальность
Функция пригодности	Целевая функция задачи планирования в пространстве поиска
Популяция	Множество закодированных календарных планов работ
Родители	Несколько закодированных решений из популяции
Скрещивание (кроссингвер)	Генетический оператор, осуществляющий обмен генами между родителями согласно алгоритму
Потомки	Несколько закодированных решений, получаемых путем применения оператора скрещивания к родителям
Мутация	Генетический оператор, осуществляющий перестановку генов в отдельном закодированном решении согласно алгоритму

Эволюционная модель	Математическая модель планирования
Инверсия	Генетический оператор, осуществляющий инвертирование нескольких генов в отдельном закодированном решении согласно алгоритму
Селекция (отбор)	Выбор набора закодированных решений из текущей популяции в новую популяцию согласно алгоритму
Поклоение	Итерация работы эволюционного алгоритма

Схема интеграции генетического алгоритма (ГА) и имитационного моделирования, предложенная в работах Курейчика В.В. [55] и Осабы Е. [18], приведена на рис. 1.1. Интеграция эволюционного и имитационного моделирования при решении задачи планирования позволяет сократить пространство поиска решений в ходе проведения генетической оптимизации.

Рисунок 1.1 – Схема интеграции имитационного моделирования и генетических алгоритмов при решении оптимизационных задач

Таким образом, целью исследования является разработка нового метода и программного обеспечения планирования, интегрирующего методы имитационного, мультиагентного, эволюционного моделирования и численных методов снятия неполноты исходной информации с целью учета особенностей задачи планирования проектных работ: многокритериальности, динамического характера процессов исполнения проектных работ, наличия ограничений, необходимости применения экспертных знаний о предметной области планирования, неполноты исходной информации и оптимизационного характера задачи планирования.

1.4 Методы стохастического планирования

Методы стохастического планирования предназначены для решения задачи стохастического планирования, в которой присутствует неполнота исходной информации, связанная с вероятностным заданием длительности операций, числа работ, стоимости работ, количества ресурсов и т.д.

В литературе [26] выделяются три типа методов стохастического планирования в зависимости от способа сведения задачи к детерминированной: предсказательные (predictive), проактивные (proactive) и реактивные (reactive) методы (рис. 1.2).

Рисунок 1.2 – Стохастические методы решения задачи планирования

Предсказательные методы решают детерминированную задачу планирования, в которой все стохастические значения параметров заменены на их математические ожидания.

Проактивные методы ставят своей целью увеличение робастности найденного календарного плана таким образом, чтобы план оставался, по крайней мере, осуществимым при смене значений параметров планирования [3,8-10,23]. В свою очередь, проактивные методы делятся на методы резервирования (*redundancy based methods*), робастные методы (*robust methods*) и методы гибкого планирования (*contingent methods*) [26]. *Методы резервирования* достигают робастности календарного плана к изменениям начальных условий планирования путем ведения избыточных ресурсов (субподрядных ресурсов) и избыточного времени на выполнение проекта. Избыточное время и ресурсы будут потрачены на выполнение дополнительных проектов в случае их появления без ущерба для текущих проектов. Целью *робастных методов* является минимизация взвешенной суммы ожидаемых отклонений от планируемого и реализованного календарных планов. Методы *гибкого планирования* можно рассматривать как проактивные, так и как реактивные методы. В данных методах события, приводящие к нарушению работы календарного плана, заранее известны и моделируются для набора календарных планов. Для каждого календарного плана проводится оценка чувствительности к возникновению различных событий с помощью моделирования и выбирается наименее чувствительный к изменениям внешней среды календарный план.

Реактивные методы включают в себя две группы методов: методы исправления текущего календарного плана (*baseline schedule repair methods*) и методы динамического планирования (*dynamic scheduling methods*). Методы исправления текущего календарного плана в зависимости от взятого за основу календарного плана делятся на предсказательно-реактивные (*predictive-reactive*) и проактивно-реактивные (*proactive-reactive*). Предсказательно-реактивные методы применяются в случаях, когда степень неполноты исходной информации планирования слишком велика и невозможно описать, какие события могут произойти в системе. Самым простым представителем данных методов является алгоритм правого сдвига операций текущего календарного плана (*right shift rule*) [26]. Методы *динамического планирования* рассматривают процесс планирования как итерационный процесс улучшения целевой функции календарного плана при появления дополнительных условий и ограничений в ходе планирования работ в реальном времени [27,37].

Проактивные методы стохастического планирования являются в настоящее время наиболее популярными среди исследователей. Основной идеей проактивных методов является выделение двух стадий планирования: стадии снятия неполноты исходной информации и приведения стохастической задачи к детерминированной и стадии решения детерминированной задачи планирования. Для снятия неполноты исходной информации в различных исследованиях применяются разные методы: двухстадийный алгоритм на основе целочисленного программирования [3], эвристический алгоритм на основе алгоритма табу [8], статистическое моделирование по методу Монте-Карло [10]. Обратный порядок стадий проактивного планирования применяется в работе [9]: сначала решается детерминированная задача планирования, полученная путем замещения всех неизвестных значений параметров их математическим ожиданием, затем найденный календарный план модифицируется путем добавления избыточных временных слотов с целью увеличения робастности расписания.

Проведем в ходе планирования работ анализ неполноты исходной информации, связанной с вероятностью появления дополнительных проектов, и осуществим оценку устойчивости выбранного календарного плана работ к изменениям внешней среды. Наиболее близким методом стохастического планирования, решающим поставленные задачи, является проактивный метод гибкого планирования.

Целью работы является разработка нового проактивного метода и программного обеспечения гибкого планирования, основанного на интеграции имитационного, мультиагентного, эволюционного моделирования.

1.5 Выводы

В ходе проведенного исследования выявлены особенности рассматриваемой задачи планирования работ: многокритериальность; наличие ограничений; наличие неполноты исходной информации, связанной с возможностью вероятностного задания значений параметров задачи планирования и возможностью появления дополнительных работ в плане; оптимизационный характер задачи планирования; большая размерность пространства поиска решения задачи.

Проведен обзор следующих методов, применяемых для решения задачи планирования: сетевых методов, методов имитационного мультиагентного моделирования, эволюционных методов, стохастических

ческих методов, гибридных методов, методов теории расписаний. В результате проведения обзора сделан вывод о необходимости интеграции методов имитационного, мультиагентного, эволюционного и стохастического моделирования при решении задачи планирования с целью учета выявленных особенностей задачи.

Требует дальнейшего исследования вопрос разработки гибридного метода планирования с временными ограничениями на основе интеграции имитационного мультиагентного и эволюционного моделирования, а также численных методов снятия неполноты исходной информации и многокритериальности целевой функции.

2 МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.1 Требования к методу планирования

Основными этапами метода планирования процессов в условиях неполноты исходной информации являются:

1. Выбор стратегии распределения собственных ресурсов по работам с учетом привлечения субподрядных ресурсов.
2. Построение ЛПР начального календарного плана работ.
3. Оценка календарного плана с помощью имитационной модели исполнения работ.
4. Формирование набора календарных планов путем оптимизации начального календарного плана.
5. Выбор наиболее эффективного календарного плана из набора с учетом возникающей неполноты исходной информации.

Исходя из основных этапов, можно сформулировать следующие требования к методу планирования в условиях неполноты исходной информации:

1. Ориентация на имитационное моделирование процессов преобразования ресурсов и отражения следующих особенностей данных процессов: учет различных типов ресурсов (материальных, трудовых, финансовых), учет длительности и условий запуска операций; возможность задания средств выполнения операции, учет возникновения и разрешения конфликтов на общих ресурсах и средствах, иерархическое представление структуры процесса.
2. Возможность моделирования различных стратегий (сценариев) распределения ресурсов с помощью интеллектуальных агентов; данное требование предполагает наличие следующих элементов: модели агента, базы знаний агента, модели взаимодействия агентов.
3. Применение ситуационного подхода: наличие в модели агента механизмов диагностирования ситуаций и поиска решений.
4. Применение эволюционных методов оптимизации, позволяющих осуществлять поиск набора решений (календарных планов) с учетом временных ограничений и возможности привлечения субподрядных ресурсов.

5. Применение численных методов снятия неполноты исходной информации.

6. Наличие механизма интеграции методов эволюционного и имитационного моделирования и численных методов снятия неполноты исходной информации.

Рассмотрим постановку задачи планирования с учетом приведенных выше требований.

2.2 Постановка задачи планирования работ в условиях неполноты исходной информации

Рассмотрим задачу планирования уникальных проектов, связанную с определением календарного плана работ [56]. Все операции проектов должны быть выполнены с учетом временных ограничений на начало работ, задаваемых ранней и поздней датами начала работ. В случае нехватки собственных трудовых ресурсов необходимо привлекать субподрядные ресурсы для выполнения всех операций в срок.

Рассмотрим математическую постановку задачи планирования работ.

Пусть портфель проектов состоит из N операций и R нескладируемых ресурсов (каждый со своей компетенцией) с соответствующими индексами $i = 1, 2, \dots, N$, $r = 1, 2, \dots, R$. Пусть задано время старта проекта t_0 , время окончания составления расписания T и для каждого ресурса r задано доступное количество данного ресурса Q_r . Пусть для каждой операции i определены следующие характеристики: время выполнения $d_i \geq 0$, количество потребляемых ресурсов выделенной компетенции $q_{i,r} \geq 0$, стоимость одного дня выполнения операции единичным количеством ресурса выделенной компетенции $s_{i,r} \geq 0$, раннее время начала операции $\tau_i^0 \geq 0$ и позднее время начала операции $\tau_i^1 \geq 0$. Без ограничения общности будем считать, что набор операций упорядочен по возрастанию стоимости $s_{i,r}$.

Требуется найти расписание проекта, задаваемое временем старта каждой операции x_i , $i = 1, 2, \dots, N$, $x_i \in \mathbb{N}$.

Уточним рассматриваемые целевые функции задачи планирования проектных работ: 1) минимизация стоимости субподрядных работ; 2) минимизация суммарного времени простоя собственных отделов. Последняя целевая функция актуальна для компаний, применяющих фиксированную оплату труда, поскольку в этом случае простой сотрудников также оплачивается, что не выгодно для компании.

Пусть $I(t, r) = \{i = 1, \dots, m \mid x_i \leq t < x_i + d_i \text{ \& } q_{i,r} \neq 0\}$ – множество индексов операций, выполняемых в момент времени $t \geq t_0$ и использующих ресурс r . Поскольку возможно привлечение дополнительного (субподрядного) количества ресурса r , то возможны следующие ситуации: 1) $\sum_{i \in I(t,r)} q_{i,r} \leq Q_r$ – в случае выполнения всех операций с индексом $i \in I(t, r)$ собственным ресурсом компетенции r в момент времени t ; 2) $\sum_{i \in I(t,r)} q_{i,r} > Q_r$ – в случае привлечения дополнительного (субподрядного) количества ресурса компетенции r для выполнения операций с индексом $i \in I(t, r)$ в момент времени t . Тогда простой в процентах собственных ресурсов компетенции r в момент времени t будем рассчитывать по формуле:

$$Z_{r,t} = \begin{cases} \sum_{i \in I(t,r)} (1 - q_{i,r} / Q_r) \cdot 100\%, & \sum_{i \in I(t,r)} q_{i,r} < Q_r, \\ 0\%, & \sum_{i \in I(t,r)} q_{i,r} \geq Q_r. \end{cases} \quad (2.1)$$

Пусть $I^-(t, r) = \left\{ i = 1, \dots, m \mid i \in I(t, r) \text{ \& } \sum_i q_{i,r} \leq Q_r \right\}$ – множество индексов операций, выполняемых в момент времени $t \geq t_0$ и использующих собственный ресурс r в пределах доступного количества Q_r . Тогда множество индексов операций, выполняемых в момент времени $t \geq t_0$ и использующих субподрядный ресурс r , определим следующим образом:

$$I^*(t, r) = I(t, r) \setminus I^-(t, r) = \{i = 1, \dots, m \mid i \in I(t, r) \text{ \& } i \notin I^-(t, r)\}.$$

Стоимость привлекаемого субподряда компетенции r в момент времени t будем рассчитывать по формуле:

$$SC_{r,t} = \sum_{i \in I^*(t,r)} s_{i,r} q_{i,r}. \quad (2.2)$$

Задача планирования проектных работ формализуется следующим образом:

$$OF_1 = \sum_{t=t_0}^T \sum_{r=1}^R SC_{r,t} \rightarrow \min \quad (2.3)$$

$$OF_2 = \sum_{t=t_0}^T \sum_{r=1}^R Z_{r,t} \rightarrow \min \quad (2.4)$$

$$\tau_i^0 \leq x_i \leq \tau_i^1, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad x_i \in \mathbb{N} \quad (2.5)$$

Целевая функция (2.3) минимизирует суммарную стоимость субподрядных работ на портфель проектов. Целевая функция (2.4) минимизирует суммарный простой собственных отделов. Ограничения (2.5) накладывают временные рамки на даты начала выполнения операций.

Рассмотрим математическую модель объекта многокритериальной оптимизации в условиях неполноты исходной информации [57]:

$$y = \{g_1(\varphi(x, z)), \dots, g_m(\varphi(x, z))\}, \quad x \in X, z \in Z, y \in Y, \quad (2.6)$$

где $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – конечное множество альтернатив (календарных планов работ); каждому календарному плану x соответствует набор дат начала операций;

$Z = \{z_1, \dots, z_s\}$ – конечное множество состояний внешней среды;

$\varphi(x, z)$ – функционал преобразования альтернативы x при состоянии z в некоторый исход;

$G = \{g_1, \dots, g_m\}$ – конечное множество критериев оценки исходов альтернативы x ; в случае определения критериев (2.3) и (2.4) задачи планирования имеем $m = 2$ и множество G принимает вид: $G = \{OF_1, OF_2\}$;

$Y = \{y_{ij}\}_{i=1 \dots n}^{j=1 \dots s}$ – конечное множество решений.

В общем случае множества X, Z, Y могут быть бесконечными. В случае конечных множеств значения $\{y_{ij}\}$ задают *матрицу решений*. В модели (2.6) каждый элемент матрицы решений представляет собой совокупность m оценок исходов альтернативы x при некотором состоянии среды z .

С учетом описанной задачи планирования в условиях определенности (2.3-2.5) математическая модель задачи планирования в условиях неполноты исходной информации (2.6) принимает следующий вид:

$$y = \{OF_1(\varphi(x, z)), OF_2(\varphi(x, z))\}, \quad x \in X, z \in Z, y \in Y. \quad (2.7)$$

При анализе неполноты исходной информации исследуются состояния внешней среды Z и возможны ситуации, при которых вероятности P пребывания внешней среды в состояниях Z ($P = \{p_1, \dots, p_s\}$, $\sum_{i=1 \dots s} p_i = 1$) могут быть неизвестны.

Проблема исследования и разработки методов и средств реализации процесса субподрядного планирования в условиях неполноты исходной информации в настоящее время находится в стадии развития. В настоящий момент не существует алгоритмов субподрядного планирования с временными ограничениями в условиях стохастического поведения внешней среды.

Требуют дальнейшего исследования и разработки такие вопросы как:

1. Разработка метода субподрядного планирования с временными ограничениями в условиях неполноты исходной информации о размерности портфеля проектов.

2. Реализация проблемно-ориентированных инструментальных средств моделирования и генетической оптимизации в области процессов преобразования ресурсов, поддерживающих решение задачи субподрядного планирования с временными ограничениями в условиях неполноты исходной информации.

2.3 Разработка метода планирования работ в условиях неполноты исходной информации

Рассмотрим алгоритм работы метода мультиагентной генетической оптимизации процессов, основанный на применении генетического алгоритма, алгоритма имитации отжига и стратегии поиска новизны.

В разработанном методе мультиагентной генетической оптимизации генетический алгоритм модифицирован алгоритмом имитации отжига и стратегией поиска новизны [58] с целью повышения качества решения задачи и быстроты сходимости генетического алгоритма. Схема интегрированного алгоритма имитационного, ситуационного, экспертного, эволюционного моделирования для решения задач предметной области процессов преобразования ресурсов с использованием алгоритма имитации отжига, стратегии поиска новизны и численных методов снятия многокритериальности приведена на рис. 2.1.

Рисунок 2.1 – Схема алгоритма работы метода планирования в условиях определенности

Мультиагентная имитационная модель МППР, содержащая экспертную базу знаний ЛПР в виде продукционных правил о моделях поведения в различных ситуациях, предназначена для проведения оценки эффективности реализации альтернативных решений с помощью выделенных критериев эффективности. При этом в общем случае критериев может быть несколько, тогда они подлежат свертке в однокритериальную целевую функцию эффективности реализации альтернативного решения с помощью численных методов снятия многокритериальности.

В алгоритме поиска новизны мерой приспособленности альтернативного решения к условиям среды является оригинальность решения, которая определяется с помощью численных преобразований матрицы расстояний Хемминга между хромосомами-решениями. Оригинальность решений и их функции пригодности (значения целевой функции на выходе модели МППР) определяют различные стратегии формирования новой популяции решений (нового про-

странства поиска). Алгоритм имитации отжига предназначен для реализации комбинации предложенных стратегий формирования новых популяций. Данный алгоритм основан на аналогии с процессом отжига металла, в результате которого у металла появляются новые свойства.

Формирование новой популяции происходит путем повторения процесса скрещивания двух случайно выбранных хромосом текущей популяции. Выбор осуществляется согласно вероятностям выбора первой P_i и второй P_j хромосом:

$$P_i = \frac{1}{N} \left(1 - \exp \left(-\frac{1}{t_R} \right) \right) + p_i^{MSS} \exp \left(-\frac{1}{t_R} \right), \quad (2.8)$$

$$P_j = p_{ij}^{OSS} \left(1 - \exp \left(-\frac{1}{t_R} \right) \right) + p_j^{MSS} \exp \left(-\frac{1}{t_R} \right), \quad (2.9)$$

где N – число хромосом в популяции; R – текущий номер популяции; t_R – параметр алгоритма имитации отжига (расчет параметра приведен на рис. 2.1); p_i^{MSS} и p_j^{MSS} – вероятности выбора хромосом i и j соответственно, которые пропорциональны значению функции пригодности хромосом; p_{ij}^{OSS} – вероятность выбора хромосом i и j вместе, которая пропорциональна весу расстоянию Хемминга между хромосомами.

Расстояние Хемминга h_{ij} представляет собой число позиций в хромосомах, в которых гены хромосом отличаются. Вес расстояния Хемминга w_{ij} рассчитывается по формуле:

$$w_{ij} = \frac{R-1}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{h_{ij}} + 1, \quad (2.10)$$

где R – максимальный вес хромосомы в паре, L – длина хромосомы.

В ходе работы метода, с ростом числа сформированных поколений R увеличивается параметр t_R , что приводит к смене стратегии выбора родителей для получения новых решений. В начале поиска решения при малых значениях R согласно стратегии поиска новизны преобладает выбор наиболее отличных друг от друга решений, одно из которых оценивается высокой функцией пригодности. Этим обеспечивается разносторонний поиск новых решений путем различ-

ных комбинаций существующих. В дальнейшем стратегия сменяется на выбор обоих родителей, функции пригодности которых высоки, согласно концепции классического эволюционного моделирования. Так обеспечивается сохранение и улучшение найденных решений с хорошим результатом.

Таким образом, разработан метод мультиагентной генетической оптимизации процесса преобразования ресурсов, который отличается следующим: интеграцией имитационного, мультиагентного, эволюционного подходов и численных методов; применением имитационной мультиагентной модели исполнения работ по портфелю проектов для динамического распределения собственных и субподрядных ресурсов по операциям проектов; алгоритмом интеллектуального планирования (поиска «узких мест» и их устранения), основанном на использовании мультиагентной модели распределения ресурсов и эвристических правил смещения сроков начала выполнения работ с целью сдвига «узкого места»; алгоритмом работы информационной технологии мультиагентной генетической оптимизации, основанном на применении генетических алгоритмов, алгоритма имитации отжига и метода поиска новизны.

Рассмотрим методику решения задачи планирования проектных работ в условиях неполноты исходной информации (2.7). Методика представляет собой модификацию метода планирования в условиях определенности с помощью численных методов оптимизации и включает выполнение следующих шагов [57,59].

Шаг 1. Описание множества критериев G оценки исходов.

Поскольку оптимизация решения задачи связана с поиском максимума значения (2.7), критерии (показатели качества) решения предполагается определять также с учетом максимизации решения по отдельному критерию. При необходимости учета минимизирующего критерия следует заменить исходный критерий g_i отношением эталонного (начального) значения критериальной функции g_i^{init} к текущему значению критериальной функции g_i :

$$g_i^* = \begin{cases} g_i, & g_i \rightarrow \max \\ g_i^{init} / g_i, & g_i \rightarrow \min \end{cases} \quad (2.11)$$

Шаг 2. Определение множества состояний внешней среды Z и вероятностей P пребывания внешней среды в состояниях Z .

Шаг 3. Определение функционала φ с помощью модели МППР функционирования исследуемой системы в условиях влияния внешней среды.

Для разрабатываемой модели МППР входными параметрами будут являться значения альтернативы x и состояния среды z , а выходными параметрами — множество оценок исходов согласно выбранным критериям $\{g_1(\varphi(x, z)), \dots, g_m(\varphi(x, z))\}$.

Шаг 4. Формирование множества альтернатив X .

При решении задач управления организационными системами рассматривается область допустимых решений D , которая содержит множество оцениваемых альтернатив $X \subset D$. Задача выбора конечного множества X из бесконечного множества D не является тривиальной, поскольку формируемое множество X должно включать удовлетворительное (эффективное, оптимальное) решение задачи в условиях определенности. Для формирования множества альтернатив X будем применять метод планирования в условиях определенности, в результате работы которого формируется популяция решений, содержащая эффективное (оптимальное) решение.

Шаг 5. Формирование матрицы решений задачи многокритериальной оптимизации в условиях неполноты исходной информации. В результате применения к заданным альтернативам X функционала φ и оценки полученных исходов с помощью критериев G получим матрицу решений Y (табл. 2.1).

Таблица 2.1

**Матрица решений многокритериальной задачи
в условиях неполноты исходной информации**

	z_1	...	z_s
x_1	$g_1(\varphi(x_1, z_1)), \dots, g_m(\varphi(x_1, z_1))$	...	$g_1(\varphi(x_1, z_s)), \dots, g_m(\varphi(x_1, z_s))$
...	...	...	...
x_n	$g_1(\varphi(x_n, z_1)), \dots, g_m(\varphi(x_n, z_1))$	...	$g_1(\varphi(x_n, z_s)), \dots, g_m(\varphi(x_n, z_s))$

Шаг 6. Снятие многокритериальности задачи принятия решений.

Проведем замену векторного критерия оптимальности G на скалярный $w: \Omega \rightarrow R$. Применим численный метод линейной свертки,

подразумевающий выполнение линейного объединения всех частных критериев полезности $g_1, \dots, g_m$ в один [58-61]:

$$F(x, z) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot g_i(\varphi(x, z)) \rightarrow \max; \quad \alpha_i > 0, \quad \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1, \quad x \in X, z \in Z \quad (2.12)$$

Весовые коэффициенты $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ рассматриваются как показатели важности отдельных критериев; они могут быть как заданы ЛПР, так и вычислены, например, с помощью метода анализа иерархий Т.Л. Саати [60].

Применение метода линейной свертки предполагает наличие однородности оцениваемых критериев, которая может быть достигнута за счет использования при расчетах критериев отношения (2.11). Постановка задачи (2.7) с учетом (2.12) примет вид:

$$y = F(x, z) \rightarrow \max, \quad y \in Y, x \in X, z \in Z, \quad (2.13)$$

где F — функция реализации альтернативы x при состоянии среды z .

Выражение (2.13) представляет собой классическую постановку однокритериальной задачи принятия решений в условиях неполноты исходной информации. Матрица решений Y для данной задачи представлена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Матрица решений задачи в условиях неполноты исходной информации

	z_1	...	z_s
x_1	$F(x_1, z_1)$	...	$F(x_1, z_s)$
...	...	...	...
x_n	$F(x_n, z_1)$	...	$F(x_n, z_s)$

Шаг 7. Снятие неполноты задачи планирования.

Рассмотрим снятие неполноты исходной информации для задачи планирования с помощью численных методов.

Пусть задана функция реализации (2.13), при этом F характеризует «доход», полученный от применения альтернативы x и реализовав-

шегося исхода. Тогда согласно [61] задача (2.13) эквивалентна задаче максимизации математического ожидания «дохода»:

$$J_1(x) = \overline{F(x, z)} = \sum_{i=1}^S p_i \cdot F(x, z_i) \rightarrow \max_{x \in X}, \quad (2.14)$$

где черта сверху означает математическое ожидание величины;

$J_1(x)$ – функционал критерия математического ожидания (критерия Байеса-Лапласа).

По аналогии с функционалом критерия математического ожидания определим функционал критерия ожидаемого значения дисперсии:

$$J_2(x) = \left[\overline{F(x, z)} - \overline{\overline{F(x, z)}} \right]^2 = 1/S \cdot \sum_{i=1}^S \left[F(x, z_i) - \sum_{j=1}^S (p_j \cdot F(x, z_j)) \right]^2 \rightarrow \min_{x \in X} \quad (2.15)$$

Критерий Байеса-Лапласа характеризует «средний доход» при принятии альтернативы x , критерий ожидаемого значения дисперсии характеризует степень склонности к риску ЛПР при выборе альтернативы x . Матрица решений задачи (2.14) приведена в табл. 2.3 матрица решений задачи (2.15) строится аналогичным образом.

Таблица 2.3

Матрица решений задачи при критерии Байеса-Лапласа

x_1	$J_1(x_1)$
...	...
x_n	$J_1(x_n)$

Рассмотрим четыре основных критерия снятия неполноты исходной информации с помощью численных методов [61]. Снятие неполноты приводит к формированию вектора решений $J(x)$, не зависящего от состояния z . Альтернативы x оцениваются по значениям вектора $J(x)$.

1. Критерий Вальда (критерий гарантированного результата, критерий максимина) позволяет представить задачу (2.13) в следующем виде:

$$Jv(x) = \min_{z_i \in Z} F(x, z_i) \rightarrow \max_{x \in X}. \quad (2.16)$$

При применении данного критерия выбирается лучшее решение при наиболее неблагоприятной внешней ситуации. Данная формула справедлива, если F характеризует «доход», полученный от исхода, реализовавшегося при применении альтернативы x . В противном случае максиминный критерий превращается в минимаксный. Недостатком работы данного критерия является его ориентация на самые худшие ситуации, что не предоставляет возможности проведения оценки возникновения благоприятных ситуаций.

2. Критерий Сэвиджа (критерий минимального сожаления) позволяет представить задачу (2.13) в следующем виде:

$$Js(x) = \max_{z_j \in Z} \left(\max_{x_j \in X} F(x_j, z_j) - x_j \right) \rightarrow \min_{x \in X}. \quad (2.17)$$

При использовании данного критерия формируется матрица сожалений $R(x, z)$, которая оценивает потери при предпочтении одной альтернативы другим при фиксированном состоянии z :

$$R(x, z) = \max_{x_j \in X} F(x_j, z_i) - x_j. \quad (2.18)$$

К матрице сожалений применяется минимаксный критерий, позволяющий минимизировать потери в условиях наихудшей ситуации z . Недостатки работы данного критерия вытекают из недостатков применения минимаксного критерия.

3. Критерий Бернулли (принцип недостаточного основания) позволяет представить задачу (2.13) в следующем виде:

$$Jb(x) = \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^S F(x, z_i) \rightarrow \max_{x \in X}. \quad (2.19)$$

При применении данного критерия все события внешней среды считаются равновероятными, что является недостатком работы данного метода.

4. Критерий Гурвица (критерий пессимизма-оптимизма) позволяет представить задачу (2.13) в следующем виде:

$$Jg(x) = \alpha \cdot \max_{z_i \in Z} F(x, z_i) + (1 - \alpha) \cdot \min_{z_i \in Z} F(x, z_i) \rightarrow \max_{x \in X}, \quad (2.20)$$

где α — показатель, характеризующий склонность ЛПР к пессимизму или оптимизму. Данная формула справедлива, если F характери-

зует «доход» при применении альтернативы x . При $\alpha = 0$ наступает случай крайнего пессимизма, критерий анализирует только худшие ситуации.

ЛПР с целью снятия неопределенности вправе выбрать тот критерий, который считает наиболее обоснованным с учетом специфики решаемой задачи планирования.

Шаг 8. Выбор альтернативы x .

В случае применения численных методов на шаге 7 имеем вектор критериальных функций $\{J(x_1), \dots, J(x_n)\}$, на котором в зависимости от критерия находим либо максимум, либо минимум среди значений.

Для критерия Байеса-Лапласа, например, решением задачи (2.13) будет являться альтернатива $x_{i^*} : i^* = \arg \max_i J_1(x_i)$. Для критерия ожидаемого значения дисперсии решением задачи (2.13) будет являться альтернатива $x_{i^*} : i^* = \arg \min_i J_2(x_i)$.

2.4 Сравнительный анализ нового метода планирования и существующих методов

Рассмотрим следующие методы, поддерживающие решение задачи планирования проектных работ: классические сетевые методы планирования (метод критического пути и методы теории расписаний; гибридный агентный метод Клейменовой Е.М. и Скобелева П.О., гибридный эволюционный метод Курейчика В.В. и гибридный метод МГО в условиях неполноты исходной информации.

В части сравнения метода планирования проектных работ в условиях неполноты исходной информации, анализ сетевых методов планирования позволяет выделить следующие недостатки данных методов:

1. Громоздкость и плохая читаемость стохастических сетевых графиков, построенных с помощью языка GERT. Несмотря на то, что в работе [7] предложен ряд методов, направленных на упрощение сетевого графика, в том числе метод декомпозиции, данный недостаток не устраняется полностью. Связано это с тем, что метод GERT ориентирован на анализ сети с узлами, входы которых описываются с помощью логической операции «И». В ходе преобразования произвольной стохастической сети к сети подобного вида согласно принципам, приведенным в работе [7], число дуг и узлов сети увеличивается, что добавляет громоздкости описанию и затрудняет восприятие и анализ сети.

2. Отсутствие методов оптимизации субподрядных работ. Метод критического пути позволяет назначать сторонние ресурсы на выполнение работ критического пути и проводить оценку эффективности назначения в зависимости от соотношения стоимости выполнения работ и сокращения сроков выполнения проекта. Тем не менее, метод критического пути не имеет встроенных механизмов оптимизации субподрядных работ; данную функцию пользователь выполняет вручную на основании анализа критического пути и резервного времени работ при помощи имеющегося опыта, квалификации и интуиции.

3. Отсутствие средств формализации сценариев принятия решений при распределении ресурсов по работам (построения моделей ЛПР, работающих со знаниями).

4. Отсутствие учета складированных ресурсов (потребляемых и производимых в результате выполнения работ проекта).

Метод Клейменовой Е.М. и Скобелева П.О. предназначен для планирования проектных работ в аэрокосмической области путем построения мультиагентной системы для оперативного распределения ресурсов в режиме реального времени с учетом возможности корректировки состава и характеристик планируемых проектов, задач и ресурсов. Метод включает фазы начального бесконфликтного и дальнейшего проактивного перепланирования задач (с конца или от начала), последовательно улучшающего результаты на каждой итерации [4]. Фаза бесконфликтного планирования подразумевает распределение ресурсов путем последовательного выбора агентами-задачами необходимого ресурса и генерации временного интервала (слота) занятости ресурса, который записывается в запланированные слоты агента-ресурса. Фаза проактивного планирования предполагает разрешение для каждого агента-ресурса конфликтов запланированных слотов, назначенных агентами-задачами, путем рекурсивных переговоров согласно описанным протоколам взаимодействия агентов ПВ-сети. ПВ-сеть представляет собой мультиагентную систему, в которой каждый агент характеризуется потребностями (П) и возможностями (В); агенты ПВ-сети ведут переговоры для удовлетворения своих потребностей с помощью чужих возможностей [4,37-38].

К недостаткам данного метода, по сравнению с предложенным, относятся следующие:

1. отсутствие методов оптимизации субподрядных работ. Метод Клейменовой Е.М. поддерживает описание агента субподрядного ре-

сурса в ПВ-сети, но не предоставляет механизмов определения оптимального количества подобных агентов с учетом выполнения всех работ в срок;

2. отсутствие поддержки анализа альтернативных планов работ и распределений ресурсов по работам;

3. отсутствие учета складированных ресурсов.

Метод Курейчика В.В. [28,55] предназначен для моделирования дискретных процессов, протекающих в организационно-технических системах, и оптимизации управляемых параметров процессов с помощью генетических алгоритмов. На рис. 2.2 представлена схема работы метода Курейчика В.В., согласно которой поставленная задача решается ГА, а имитационная модель применяется для расчета многокритериальной функции пригодности особей очередного поколения. Экспертная система при этом используется для анализа и коррекции параметров работы ГА (вероятностей применения генетических операторов). Предложенный метод был реализован в среде РДО [55] и с его помощью решена задача планирования работы цеха. Для поставленной задачи целью блока оптимизации являлся подбор оптимальных значений управляемых переменных ИМ, в качестве которых выступали приоритеты выполняемых заказов. Функцией пригодности служила функция штрафов за срывы заказов.

Рисунок 2.2 – Схема работы метода Курейчика В.В.

К недостаткам данного метода относятся следующие:

1. Ориентация метода на широкий класс задач управления ОТС, что приводит к необходимости разработки пользователем онтологии задачи планирования и разработки собственного генетического алгоритма, предназначенного для решения задачи планирования (опре-

деление способа кодирования фенотипа-решения в генотип-хромосому, разработка генетических операторов согласно выбранному представлению хромосомы, определение условия окончания работы алгоритма).

2. Отсутствие механизмов учета и оптимизации субподрядных работ, учета складированных ресурсов.

3. Отсутствие средств формализации сценариев принятия решений при распределении ресурсов по работам.

4. Отсутствие возможности учета структурной неполноты исходной информации, связанной с непредвиденными изменениями структуры проекта: количества работ и ресурсов. В то же время метод Курейчика В.В. предоставляет возможность учета параметрической неполноты задачи планирования за счет возможности задания в имитационной модели с помощью закона распределения длительности и стоимости работ.

Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 2.4 [62-66].

Таблица 2.4

**Сравнительный анализ методов планирования
в условиях неполноты исходной информации**

Критерий сравнения	Классические методы	Агентный Метод Клей- меновской Е.М.	Эволюцион- ный Метод Курейчика В.В.	Новый метод в условиях неполноты
Решаемые задачи				
Планирование календарных сроков работ	+	+	+	+
Учет нескладированных ресурсов	+	+	+	+
Учет складированных ресурсов	НЕТ	НЕТ	НЕТ	+
Балансировка ресурсов	+	+	НЕТ	+
Учет субподрядных работ	+	+	НЕТ	+
Оптимизация субподрядных работ	НЕТ	НЕТ	НЕТ	+
Перепланирование работ	НЕТ	+	НЕТ	+
Анализ альтернативных календарных планов	НЕТ	НЕТ	+	+

Окончание табл. 2.4

Критерий сравнения	Классические методы	Агентный Метод Клейменовой Е.М.	Эволюционный Метод Курейчика В.В.	Новый метод в условиях неполноты
Методы решения задачи планирования в условиях определенности				
Имитационное моделирование	НЕТ	НЕТ	+	+
Мультиагентное моделирование	НЕТ	+	НЕТ	+
Эволюционное моделирование	НЕТ	НЕТ	+	+
Экспертное моделирование	НЕТ	+	+	+
Ситуационный подход	НЕТ	+	НЕТ	+
Эвристические алгоритмы	+	НЕТ	+	+
Рассмотрение неполноты исходной информации				
Параметрическая неполнота	+	НЕТ	+	+
Структурная неполнота	+	+	НЕТ	+

Как следует из таблицы ни один из методов, за исключением нового метода, не обладает полной функциональностью для решения задачи планирования проектных работ в условиях неполноты исходной информации. Так, ни один из методов не поддерживает оптимизацию субподрядных работ и учет складированных ресурсов. Только методы Курейчика В.В. и предложенный метод обеспечивают проведение анализа альтернативных календарных планов работ, позволяющего находить эффективное (оптимальное) решение задачи планирования. Таким образом, можно сделать вывод о том, что все анализируемые методы планирования направлены на решение задачи балансировки нескладированных ресурсов с целью сокращения времени выполнения проекта.

Метод планирования в условиях неполноты исходной информации позволяет: реализовывать алгоритм распределения нескладированных и складированных ресурсов с помощью имитационного, мультиагентного и экспертного моделирования; осуществлять оптимизацию субподрядных ресурсов путем анализа альтернативных календарных планов с помощью интеграции генетических алгорит-

мов и имитационного моделирования; проводить перепланирование работ в случае появления дополнительных проектов с помощью интеграции имитационного моделирования и численных методов снятия неопределенности.

Полученные теоретические результаты (метод планирования в условиях неполноты исходной информации) позволяют реализовать программное обеспечение, относящееся к классу интеллектуальных систем принятия решений, которое использует методы экспертного, имитационного, ситуационного, мультиагентного и эволюционного моделирования, численные методы оптимизации.

2.5 Выводы

В ходе проведенного исследования сформулированы требования к новому методу планирования в условиях неполноты исходной информации и многокритериальности целевой функции. Проведена математическая постановка рассматриваемой задачи календарного планирования.

Разработан новый метод планирования, предназначенный для проведения календарного планирования проектных работ в условиях неполноты исходной информации. Метод основан на интеграции методов имитационного и эволюционного моделирования и численных методов снятия неполноты информации и многокритериальности целевой функции.

Проведено сравнение разработанного метода в условиях неполноты исходной информации с существующими методами планирования работ: классическими методами планирования (методы теории расписаний и сетевые методы); методом Клейменовой Е.М. и Скобелева П.О., осуществляющим планирование посредством переговоров агентов ПВ-сети, и методом Курейчика В.В., предполагающим проведение планирования с помощью интеграции генетических алгоритмов и имитационного моделирования. Результаты сравнения показали преимущества нового метода для решения поставленной задачи.

Полученные теоретические результаты позволяют реализовать программное обеспечение, которое использует методы экспертного, имитационного, ситуационного, мультиагентного и эволюционного моделирования, численные методы.

3 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И ПЛАНИРОВАНИЯ

3.1 Задача планирования проектных работ в условиях неполноты исходной информации

Рассмотрим проектную деятельность предприятия ЗАО «Телесистемы», реализующего портфель проектов с помощью следующих отделов: проектного отдела, состоящего из 6 человек, производственного отдела, состоящего из 8 человек, и отдела материально-технического обеспечения, состоящего из 1 человека [56]. Рассмотрим задачу календарного планирования проектных работ на предприятии ЗАО «Телесистемы» в виде (2.6) при условии возможности появления дополнительных комплексных проектов (требующих наличия свободных ресурсов как проектного, так и производственного отделов предприятия) весной, летом, осенью и зимой.

Применим разработанный метод планирования в условиях неполноты сходной информации к рассматриваемой задаче.

Шаг 1. Описание множества критериев G оценки исходов.

Рассмотрим четыре критерия оценки полезности исхода: суммарную стоимость субподрядных работ по портфелю проектов SS , общий простой проектного SUp и производственного SUm отделов за год в процентах, коэффициент использования трудовых ресурсов предприятия M_y .

Оценка значений первых трех критериев проводится согласно формулам (2.3–2.4) с помощью проведения экспериментов с разработанной моделью МППР выполнения проектных работ на предприятии «Телесистемы». Последний критерий, M_y , предназначен для оценки степени равномерного использования ресурсов за период T . В контексте анализа трудовых ресурсов данный критерий позволяет судить о равномерном распределении работ по отделам предприятия. Формула расчета коэффициента использования трудовых ресурсов представлена ниже [2]:

$$M_y = \sum_{i=k}^T [ResourceDemand_i \cdot (i - k)] \rightarrow \max, \quad (3.1)$$

где i – день, когда поступает запрос на выделение свободных ресурсов для выполнения операций;

k — день, когда запрос на ресурсы формируется впервые;

$ResourceDemand_i$ — требуемый объем ресурсов для выполнения операций в день i .

Шаг 2. Определение множества состояний внешней среды Z и вероятностей P пребывания внешней среды в этих состояниях.

Определим множества Z и P через множество возникающих в системе событий $L = \{l_1, \dots, l_r\}$ и множество вероятностей возникновения событий $P_L = \{p_L(l_1), \dots, p_L(l_r)\}$. Рассмотрим множество L , состоящее из следующих $r = 8$ событий: появление/непоявление дополнительного комплексного проекта в каждое из времен года. Граф определения возможных состояний исследуемой системы с помощью выделенных событий представлен на рис. 3.1.

Рисунок 3.1 — Граф состояний системы

В результате построения графа состояний системы выделено $s = 16$ состояний $z_i \{SA, \dots, SP\}$, причем каждое состояние характеризуется одновременным выполнением h событий множества L : $z_i \Leftrightarrow \exists L_i^* \subseteq L : L_i^* = l_i^1 \wedge l_i^2 \wedge \dots \wedge l_i^h$, $l_i \in L$, $z_i \in Z$, $i = 1..s$, $h \leq r$. Определим вероятность p_i пребывания системы в состоянии z_i согласно выражению:

$$p_i = \prod_{j=1}^h p_L(l_i^j), \quad l_i^j \in L_i^*, \quad p_L(l_i^j) \in P_L, \quad \sum_{i=1}^s p_i = 1. \quad (3.2)$$

Для решаемой задачи $r = 8$, $h = 4$, $s = 16$; рассматривается 8 событий, по которым определяется 16 состояний системы, причем каждое

состояние задается одновременным выполнением 4 событий. Заданные вероятности наступления событий представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Множества событий L и вероятностей наступления событий P_L

l_i	Проект весной есть, l_1	Проекта весной нет, l_2	Проект летом есть, l_3	Проекта летом нет, l_4	Проект осенью есть, l_5	Проекта осенью нет, l_6	Проект зимой есть, l_7	Проекта зимой нет, l_8
$p_L(l_i)$	0.75	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0.75

Вероятности нахождения системы p_i в одном из состояний z_i , рассчитанные при данных начальных условиях, представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Множества состояний среды Z и вероятностей пребывания системы в этих состояниях P

z_i	SA	SB	SC	SD	SE	SF	SG	SH	SI	SJ	SK	SL	SM	SN	SO	SP
p_i	0.05	0.14	0.05	0.14	0.05	0.01	0.01	0.14	0.05	0.05	0.05	0.01	0.01	0.14	0.05	0.05

Рассчитаем для примера вероятность нахождения системы в состоянии $z_j = SA$: $L_1^* = l_2 \wedge l_4 \wedge l_6 \wedge l_8$ (см. рис. 3.1). Воспользуемся формулой (3.2):

$$p_1 = p_L(l_2) \cdot p_L(l_4) \cdot p_L(l_6) \cdot p_L(l_8) = 0.25 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 0.75 = 0.05.$$

Шаг 3. Определение функционала φ с помощью модели МППР функционирования исследуемой системы в условиях влияния внешней среды.

Решение поставленной задачи планирования работ предполагает разработку модели МППР, описывающей процесс исполнения работ по портфелю проектов. За основу разрабатываемой модели исполнения работ была взята модель МППР решения задачи календарного планирования, построенная в системе динамического моделирования ситуаций BPsim.MAS для решения задачи планирования в условиях определенности. Данная модель была дополнена следующими входными параметрами: 1) признаками нахождения системы в одном из анализируемых состояний (да/нет) для интеграции модели с численными методами

оптимизации решения; 2) вероятностями нахождения системы в одном из анализируемых состояний для применения модели в процессе снятия неопределенности (шаг 7. В методики принятия решений в условиях неопределенности). Также модель была расширена расчетом дополнительной выходной характеристики – коэффициента использования трудовых ресурсов предприятия согласно (3.1). На рис. 3.2 приведен вид модифицированной модели в системе моделирования BPsim.MAS [52].

Рисунок 3.2 – Модифицированная модель выполнения работ в нотации МППР

Шаг 4. Формирование множества альтернатив X .

Сформируем множество альтернатив X с помощью метода эволюционно-имитационного поиска. В результате применения метода было сформировано 10 поколений хромосом, несущих в своих генах информацию о календарных сроках начала операций по проектам портфеля. Выберем в качестве множества альтернатив X набор раскодированных особей 9-го поколения работы генетического алгоритма, в котором было найдено наилучшее решение задачи. Зададим размерность множества альтернатив $n = 8$.

Шаг 5. Формирование матрицы решений задачи многокритериальной оптимизации в условиях неопределенности.

Сформируем матрицу решений поставленной задачи многокритериальной оптимизации в условиях неполноты исходной информации путем оценки выбранных альтернатив $\{x_1, \dots, x_8\}$ с помощью набора критериев $\{SS, SUP, SUM, M_y\}$ для каждого состояния системы z_j . Для этого проведем серию из $n \cdot s = 128$ экспериментов с разработанной моделью МППР, на вход которой будем подавать анализируемую альтернативу x_i и признаки наступления/ненаступления событий множества L для формирования анализируемого состояния z_j , а на выходе будем наблюдать значения выбранных критериев для текущих значений x_i и z_j , $i = 1..8$, $j = 1..16$.

Шаг 6. Снятие многокритериальности задачи принятия решений.

Проведем снятие многокритериальности решаемой задачи путем применения метода линейной свертки, предварительно приведя рассматриваемые критерии к однородному виду с помощью (2.11). В результате выполнения описанных процедур свертка критериев в функцию реализации примет следующий вид:

$$F(x, z) = \alpha_1 \cdot SS^{Init} / SS + \alpha_2 \cdot SUP^{Init} / SUP + \alpha_3 \cdot SUM^{Init} / SUM + \alpha_4 \cdot M_y / M_y^{Init} \rightarrow \max, \quad (3.3)$$

где надстрочный индекс *Init* означает критериальную оценку эталонного экспертного решения задачи планирования.

Матрица решений при значении коэффициентов $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.2$, $\alpha_3 = 0.2$ и $\alpha_4 = 0.1$ выглядит следующим образом (значения коэффициентов получены в результате экспертных оценок):

$$\begin{pmatrix} 193 & 200 & 64.3 & 72.7 & 60.5 & 200 & 68.3 & 69.7 & 209 & 78.0 & 63.4 & 72.3 & 72.4 & 74.1 & 83.3 & 86.3 \\ 160 & 166 & 63.2 & 71.4 & 62.8 & 167 & 70.5 & 70.0 & 175 & 81.1 & 63.7 & 71.0 & 72.5 & 74.1 & 81.6 & 86.0 \\ 178 & 138 & 62.0 & 70.0 & 60.1 & 185 & 67.9 & 66.6 & 146 & 76.5 & 62.7 & 69.9 & 71. & 73.8 & 80.4 & 85.9 \\ 258 & 264 & 65.0 & 73.5 & 63.9 & 265 & 71.7 & 71.3 & 273 & 81.2 & 64.5 & 72.9 & 73.4 & 75.3 & 83.9 & 87.3 \\ 256 & 262 & 65.8 & 74.2 & 62.5 & 263 & 70.2 & 69.9 & 271 & 79.8 & 64.0 & 73.7 & 72.9 & 74.8 & 84.7 & 87.0 \\ 262 & 268 & 64.3 & 72.7 & 62.7 & 269 & 70.4 & 70.0 & 277 & 80.0 & 63.8 & 72.1 & 72.7 & 74.9 & 83.0 & 87.0 \\ 346 & 353 & 64.4 & 72.8 & 62.8 & 353 & 70.6 & 70.1 & 361 & 80.1 & 63.9 & 72.3 & 72.8 & 75.0 & 83.2 & 87.1 \\ 278 & 285 & 66.0 & 74.3 & 62.9 & 285 & 70.7 & 70.3 & 294 & 80.3 & 64.2 & 73.9 & 73.1 & 75.0 & 84.8 & 87.0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Шаг 7. Снятие неполноты исходной информации и выбор решения.

Рассмотрим снятие неполноты исходной информации, поставленной задачи (сведение матрицы решений к вектору решений) с помощью численных методов.

Рассмотрим матрицу решений (3.4), сформированную с помощью проведения экспериментов с моделью МППР и применения метода линейной критериальной свертки для оценки исходов решений.

Воспользуемся *критерием Байеса-Лапласа* (2.14) для сведения матрицы решений к вектору решений $J_1(x) = \{J_1(x_1), \dots, J_1(x_8)\}$. Решением поставленной задачи календарного планирования будет являться альтернатива x_i : $i^* = \arg \max J_1(x_i)$. После выполнения преобразований имеем $J_1(x) = \{104.0; 95.8; 90.4; 121.5; 120.7; 127.7; 143; 126.5\}$. Нетрудно определить, что наилучшим решением является альтернатива x_7 со значением $J_1(x_7) = 143$. Полученные данные согласуются с результатами решения задачи календарного планирования в условиях определенности.

Исследуем устойчивость найденного решения x_7 при применении критерия Байеса-Лапласа для снятия неопределенности. Под устойчивостью решения будем понимать сохранение лучшей целевой функции решения по сравнению с целевыми функциями альтернативных решений при смене условий поиска. Для оценки устойчивости найденного решения проведем серию экспериментов по нахождению векторной функции оценки альтернатив при разных начальных условиях. Будем изменять степень важности отдельных критериев при формировании функции реализации, т.е. коэффициенты α_i формулы (3.3) и вероятности наступления событий p_L (табл. 3.1). План проведения экспериментов представлен в табл. 3.3.

Таблица 3.3

План экспериментов по исследованию устойчивости найденного решения задачи планирования

Вход	Номер эксперимента																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
α_1	0.5	0.25	0.1	0.5	0.25	0.1	0.5	0.25	0.1	0.5	0.25	0.1	0.5	0.25	0.1	0.5	0.25	0.1
α_2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2
α_3	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2
α_4	0.1	0.25	0.5	0.1	0.25	0.5	0.1	0.25	0.5	0.1	0.25	0.5	0.1	0.25	0.5	0.1	0.25	0.5
$P_L(I_p)$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	0.75	0.75	0.75	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
$P_L(I_p)$	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
$P_L(I_p)$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	0.25	0.99	0.99	0.99
$P_L(I_p)$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	0.75	0.75	0.75

По результатам проведенных экспериментов была построена зависимость векторной функции Байеса-Лапласа, компонентами которой являются оцениваемые альтернативы, от изменения начальных условий (рис. 3.3).

Анализ поведения функционала $J_f(x)$ при различных начальных условиях показал, что доминирующее значение альтернативы x_7 сохраняется при всех анализируемых ситуациях. При этом превосходство x_7 максимально в случае равновероятностных событий появления 4-х дополнительных проектов (с вероятностями, не превышающими 0.75) и выборе в качестве наиболее важного критерия минимизацию суммарной стоимости субподрядных работ. Превосходство решения x_7 минимально (правая часть графика) в случае высоких вероятностей появления 4-х дополнительных проектов и предпочтении любого из критериев. Таким образом, в результате применения критерия Байеса-Лапласа, можно сделать вывод о принятии решения в пользу альтернативы x_7 , обладающей устойчивостью к изменениям начальных условий задачи.

Рисунок 3.3 – Исследование устойчивости решения (альтернативы x_7) при применении критерия Байеса-Лапласа для снятия неполноты информации

Воспользуемся критерием ожидаемого значения дисперсии (2.15) для оценки рассматриваемых альтернатив. Сведем матрицу решений (3.4)

к вектору решений $J_\lambda(x) = \{3118; 1701; 1286; 6884; 6765; 7213; 14740; 8452\}$. Наилучшим решением является альтернатива x_3 с наименьшим значением критериальной функции $J_\lambda(x_3) = 1286$. Исследуем устойчивость найденного решения x_3 . Для этого проведем серию экспериментов согласно плану, представленному в табл. 3.3, для нахождения зависимости векторной функции $J_\lambda(x)$ от изменения начальных условий (рис. 3.4).

Анализ поведения функционала $J_\lambda(x)$ при различных начальных условиях показал, что найденное с помощью критерия ожидаемого значения дисперсии решение x_3 не является устойчивым к изменениям начальных условий. В частности, оно перестает обеспечивать минимальное ожидание дисперсии при выборе в качестве наиболее важного критерия максимизацию коэффициента использования трудовых ресурсов.

Рисунок 3.4 — Исследование устойчивости решения при применении критерия ожидаемого значения дисперсии для снятия неполноты информации

Исследование поведения дисперсии альтернативы x_7 при изменении начальных условий выявило наличие больших скачков. Скачки связаны с тем, что данная альтернатива обеспечивает лучшие по сравнению с альтернативами решения (и худшие дисперсии) в случае предпочтения критерия минимизации субподрядных работ и сравнимые с другими альтернативами решения (и сравнимые дисперсии) в случае равнове-

ятностного предпочтения критериев или предпочтении критерия максимизации коэффициента использования трудовых ресурсов.

Таким образом, на основании применения численных критериев можно сделать вывод о предпочтении в качестве решения поставленной задачи планирования работ альтернативы x_7 в случае наличия знаний о вероятностях наступления событий появления четырех дополнительных проектов. Данная альтернатива обладает устойчивостью к изменениям начальных условий при использовании критерия Байеса-Лапласа. При применении критерия ожидаемого значения дисперсии выявлены большие отклонения дисперсии решений, полученных с помощью альтернативы x_7 , т. е. высокий риск неполучения ожидаемого решения. Если для ЛПР не важна оптимизация «среднего» значения решения, а важен низкий уровень риска непопадания в «среднее» значение, тогда следует выбирать альтернативу x_3 , в противном случае — альтернативу x_7 .

Рассмотрим случай отсутствия знаний о вероятностях наступления событий появления четырех дополнительных проектов. Применим к полученной матрице (3.4) описанные критерии численной оптимизации: критерий Вальда (2.16), критерий Сэвиджа (2.17), критерий Бернулли (2.19) и критерий Гурвица (2.20) для снятия неполноты исходной информации. Проведем оценку устойчивости поведения оцениваемых альтернатив x_i при смене значений коэффициентов свертки α_i формулы (3.3). Для критерия Гурвица зададим $\alpha = 0,5$. Проведем 14 экспериментов, меняя значения коэффициентов свертки α_i . Графики поведения функций $J(x)$ при изменении значимости отдельных составляющих критериальной функции (3.3) приведены на рис. 3.5 (обозначения альтернатив взяты из рис. 3.4).

Как следует из графиков, применение критериев Сэвиджа, Бернулли и Гурвица выявляет устойчивое к изменениям коэффициентов целевой функции (3.3) оптимальное решение x_7 . Разбросы значений функции $J(x)$ наблюдаются для экспериментов, при которых в функции реализации (3.3) доминирует компонента, отвечающая за минимизацию стоимости субподрядных работ. Сближение значений функции $J(x)$ наблюдается в экспериментах, для которых данная компонента становится несущественной по сравнению с оставшимися компонентами. При применении критерия Вальда устанавливается корреляция значений функции $J(x)$ при каждом эксперименте, что связано с анализом только худших ситуаций, в которых все решения дают сопоставимый исход для каждого эксперимента.

Рисунок 3.5 — Значение функции $J(x)$ при изменении коэффициентов функции $F(x,z)$ для различных численных критериев

В результате проведенных экспериментов было выявлено решение x_7 , обеспечивающее оптимальный исход в условиях неполноты исходной информации и наилучшую устойчивость к изменению внешних факторов. Данное решение является также оптимальным для задачи в условиях определенности.

В результате применения нового метода к решению задачи планирования работ в условиях неполноты исходной информации было найдено решение, обеспечивающее лучшее значение целевой функции (2.6) среди рассматриваемых альтернатив в независимости от смены состояний внешней среды. Данное решение совпало с решением, полученным в условиях определенности, которое позволило получить экономический эффект в размере 430 000 рублей в год. Для найденного решения была проведена оценка чувствительности к изменению начальных условий поиска: значимости отдельных составляющих критериальной функции (3.3), устанавливаемой ЛПР. Был сделан вывод о чувствительности решения к изменению условий поиска и сохранении преимущества найденного решения над анализируемыми альтернативами.

3.2 Задача совершенствования организационных процессов телекоммуникационного сопровождения цехов прокатки металлургического предприятия

Сопровождение телекоммуникационных систем цехов прокатки металлургического предприятия включает в себя прием, обработку и разрешение трех типов инцидентов по шести видам предоставляемого сервиса для двух цехов горячей (ГП) и холодной (ХП) прокатки. Исполнителями процесса являются сотрудники отделов сопровождения телекоммуникационных систем цехов; каждый отдел включает в себя две группы: группу обслуживания оборудования (ГОО) и группу обслуживания телекоммуникационных систем (ГОТС). Задача совершенствования исследуемого процесса заключается в определении минимального числа сотрудников отделов при сохранении всех должностей и при обеспечении максимальной средней загрузки всех сотрудников и максимального процента разрешенных инцидентов. Данная задача была решена в [67] с помощью эволюционно-имитационного моделирования при отсутствии неопределенности в поведении внешней среды. Рассмотрим применение описанного метода планирования к решению поставленной задачи в условиях неопределенного поведения внешней среды.

Целью планирования является увеличение числа разрешенных инцидентов и увеличение загрузки сотрудников. К входным переменным процесса планирования относится число сотрудников в каждой должности. К ограничениям задачи относится требование по сохранению всех должностей.

В качестве управляемых переменных исследуемого процесса выбраны пять параметров: число сотрудников-инженеров отдела ГОО цеха горячей прокатки ГП.ГОО.Инж (диапазон изменения значений 3-4 человека), число сотрудников ГП.ГОТС.ВедИнж (1-2 чел.), ГП.ГОТС.Адм (1-4 чел.), ХП.ГОТС.Адм (1-4 чел.), ХП.ГОТС.ВедИнж (1-2 чел.). Задано число анализируемых альтернатив $K = 6$.

Определена однокритериальная целевая функция путем линейной свертки двух критериев:

$$R(x) = \alpha_1 \cdot G_1 / G_1^{init} + \alpha_2 \cdot G_2 / G_2^{init}, \quad (3.5)$$

где G_1 – критерий максимизации средней загрузки всех сотрудников в процентах, G_1^{init} установлен на уровне 80 %; G_2 – критерий максимизации процента разрешенных инцидентов, G_2^{init} установлен на уровне 100 %, коэффициенты приняты следующими: $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$.

Выделено $S = 5$ состояний внешней среды: Z_1 – интенсивность поступления инцидентов для разрешения не меняется; Z_2 – интенсивность поступления инцидентов для разрешения увеличивается на 10 %; Z_3 – интенсивность поступления инцидентов для разрешения увеличивается на 20 %; Z_4 – интенсивность поступления инцидентов для разрешения уменьшается на 10 %; Z_5 – интенсивность поступления инцидентов для разрешения уменьшается на 20 %. Вероятности пребывания среды в каждом из состояний равны между собой: $P_1(Z_1) = P_2(Z_2) = P_3(Z_3) = P_4(Z_4) = P_5(Z_5) = 0,2$.

На основании собранных статистических данных функционирования исследуемого процесса была разработана модель МППР. Агенты в модели используются для распределения инцидентов по типам и видам внутри отделов в зависимости от квалификации специалистов и наличия у них свободного времени на разрешение инцидентов. В качестве управляемого (синтезируемого) параметра процесса выступает количество сотрудников с разбивкой по должностям в каждом отделе системы.

Заданы следующие параметры эволюционно-имитационного моделирования: число популяций – 6, число хромосом – 6, вероятности применения операторов мутации и инверсии одинаковы и равны 40 %.

В результате проведения эволюционно-имитационного эксперимента сформирована матрица решений размером 6х6, содержащая значения целевой функции (3.5).

Отобранные альтернативные решения по одному из каждой строки матрицы решений этапа 7 представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

**Альтернативные решения задачи совершенствования
организационных процессов**

Альтер- натива	Значение управляемых переменных				
	ГП.ГОО.Инж	ГП.ГОТС.ВедИнж	ГП.ГОТС.Адм	ХП.ГОТС.Адм	ХП.ГОТС.ВедИнж
x1	3	2	4	3	2
x2	3	2	3	3	1
x3	3	1	3	3	1
x4	3	1	3	2	1
x5	3	1	1	1	1
x6	3	1	2	2	1

Сформирован план имитационного эксперимента по оценке с помощью имитационной модели значения функции (3.5) для каждой из выбранных альтернатив при каждом анализируемом состоянии среды.

В результате проведения имитационного эксперимента была сформирована матрица решений размером 6х5.

К полученной матрице решений был применен критерий Байеса-Лапласа [61]:

$$W(x) = \sum_{j=1}^S P_j(Z_j) \cdot R(x, Z_j) \rightarrow \max_x. \quad (3.6)$$

В результате был сформирован вектор $W(x) = \{76,88; 79,09; 78,85; 78,52; 81,51; 79,27\}$. Наилучшим решением в данном векторе является альтернатива x_5 со значением $W(x_5) = 81,51$. Полученные данные согласуются с результатами работы метода планирования в условиях определенности.

Было проведено 6 экспериментов, для которых вероятности пребывания среды в заданных состояниях варьировались. Эксперимент № 1 характеризуется равными вероятностями; для эксперимента № 2 преобладает вероятность неизменной интенсивности поступле-

ния инцидентов; для эксперимента № 3 преобладают вероятности увеличения интенсивности поступления инцидентов на 10 % и 20 %; для эксперимента № 4 преобладают вероятности уменьшения интенсивности поступления инцидентов на 10 % и 20 %, для эксперимента № 5 доминирует вероятность увеличения интенсивности поступления инцидентов на 20 %, для эксперимента № 6 доминирует вероятность уменьшения интенсивности поступления инцидентов на 20 %.

Для каждого эксперимента была проведена оценка значения функционала критерия Байеса-Лапласа $W(x)$ по формуле (3.6) для всех альтернативных решений. Результаты представлены на рис. 3.6.

Рисунок 3.6 – Зависимость функционала критерия Байеса-Лапласа для альтернативных решений от оценки вероятностей пребывания внешней среды в заданных состояниях

Анализ поведения функционала $W(x)$ при различных начальных условиях показал, что доминирующее значение альтернативы x_5 сохраняется при всех анализируемых ситуациях. При этом превосходство x_5 максимально в случае неизменной интенсивности поступления инцидентов и минимально в случае увеличения интенсивности поступления инцидентов на 20 %. Таким образом, в результате применения критерия Байеса-Лапласа, можно сделать вывод о принятии решения в пользу альтернативы x_5 .

В результате применения методов эволюционно-имитационного моделирования и снятия неопределенности к решению задачи совер-

шенствования организационных процессов телекоммуникационно-го сопровождения цехов прокатки металлургического предприятия были получены рекомендации по планированию количества сотрудников отдела сопровождения.

3.3 Задача планирования подачи плавов на устройство непрерывного литья заготовок

Метод планирования работ был применен для оптимизации работы устройства непрерывного литья заготовок (УНРС) за счет определения эффективной последовательности подачи плавов на УНРС в зависимости от качества стали, мерной длины готовых слабов и требований по сухой перековшовке.

Рассмотрим основные этапы работы УНРС [68-69]. На начало работы промковш установлен на УНРС, в кристаллизатор введена затравка, сталеразливочный ковш (стальковш) со сталью готов к разливке в промежуточный ковш (промковш). После прохождения вытягиваемого слитка из кристаллизатора через зону вторичного охлаждения, осуществляется порезка слитка на слэбы газорезкой. Порезка слэбов проводится согласно схеме раскроя отлитой плавки исходя из заданной холодной мерной длины (ХМД), рассчитанной горячей мерной длины (ГМД), момента поступления сигнала начала следующей плавки и марок стали сменяющих друг друга плавов. Раскрой плавки на слэбы зависит от параметра L , представляющего собой длину вытягиваемого слитка от последнего намеченного разреза до момента прихода сигнала начала следующей плавки. Замер параметра L осуществляется на выходе кристаллизатора. Алгоритм раскроя слэбов на границе двух плавов приведен в табл. 3.5.

Таблица 3.5
Алгоритм раскроя слэбов на границе плавов

Тип перехода на границе плавов	Условие на параметр L	Решение
Плавка «худшая на лучшую» (марка стали плавки i хуже, чем марка стали плавки $i-1$)	$L \leq 200 \text{ см}$	В $(i-1)$ -ой плавке $(k-1)$ слэбов с длиной $ГМД^{i-1}$. Слэб k с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
	$L > 200 \text{ см}$	В $(i-1)$ -ой плавке k слэбов с длиной $ГМД^{i-1}$. Слэб $(k+1)$ с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.

Тип перехода на границе плавков	Условие на параметр L	Решение
Плавка «равноценная» (марки стали плавков $i-1$ и i равноценны по качеству)	$L = 0 \text{ см}$	В $(i-1)$ -ой плавке $(k-1)$ слывов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб k с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
	$L > 0 \text{ см}$	В $(i-1)$ -ой плавке k слывов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб $(k+1)$ с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
Плавка «лучшая на худшую» (марка стали плавки i лучше, чем марка стали плавки $i-1$)	$(ГМД_{k+1}^{i-1} - L) \leq 600 \text{ см}$	В $(i-1)$ -ой плавке $(k+2)$ слывов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб $(k+3)$ с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
	$(ГМД_{k+1}^{i-1} - L) > 600 \text{ см}$	В $(i-1)$ -ой плавке $(k+1)$ слывов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб $(k+2)$ с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.

Данный алгоритм для решения задачи анализа работы УНРС с сухой перековшовкой расширен анализом ситуаций, представленных в таблице 3.6. Термин «пояс», используемый в алгоритме, означает наличие брака у сляба, связанного со смешиванием двух разных марок стали на границе плавков.

Таблица 3.6

Алгоритм раскрыя слывов при требовании сухой перековшовки на границе плавков

Условие		Решение
$L > 700 \text{ см}$		В $(i-1)$ -ой плавке k слывов с длиной $ХМД^{i-1}$. Сляб $(k+1)$ с мерной длиной $ХМД^{k+1} = L - 200 \text{ см}$ идет не в заказ (переназначение с заказа $i-1$). Сляб $(k+2)$ с мерной длиной $ХМД^{k+2} = 500 \text{ см}$ идет в брак (переназначение с заказа i). Сляб $(k+3)$ с новой мерной длиной $ХМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
$L \leq 700 \text{ см}$, нет пояса на слябе $k+1$	$507 \text{ см} < (ХМД^{i-1} + L - 200 \text{ см}) < 1030 \text{ см}$	В $(i-1)$ -ой плавке $k-1$ слывов с длиной $ХМД^{i-1}$. Сляб k с мерной длиной $ХМД^{i-1}$ идет не в заказ (переназначение с заказа $i-1$). Сляб $(k+1)$ с новой мерной длиной $ХМД^i$ будет первым в i -ой плавке.

Окончание табл. 3.6

Условие	Решение
$(ХМД^{i-1} + L - 200\text{см}) \geq 1030\text{см}$	В (i-1)-ой плавке k-1 слябов с длиной $ХМД^{i-1}$. Слябы k и (k + 1) с мерной длиной $ХМД^k = ХМД^{k+1} = (ХМД^{i-1} + L - 200\text{см})/2$ идут не в заказ (переназначение с заказа i-1). Сляб (k + 2) с новой мерной длиной $ХМД^i$ будет первым в i-ой плавке.
$(ХМД^{i-1} + L - 200\text{см}) \leq 507\text{см}$ и пояс на слябе k	В (i-1)-ой плавке (k-1) слябов с длиной $ХМД^{i-1}$. Сляб k с мерной длиной $ХМД^k = ХМД^{i-1} + L + 150\text{см}$ (но не менее 507см) идет в брак (переназначение с заказа i-1). Сляб (k+ 1) с новой мерной длиной $ХМД^i$ будет первым в i-ой плавке.
$(ХМД^{i-1} + L - 200\text{см}) \leq 507\text{см}$ и пояс на слябе k-1	В (i-1)-ой плавке k-2 слябов с длиной $ХМД^{i-1}$. Сляб (k-1) с мерной длиной $ХМД^{i-1}$ идет не в заказ (переназначение с заказа i-1). Сляб k с новой мерной длиной $ХМД^i$ будет первым в i-ой плавке (данный сляб переназначен с заказа i-1).
$L \leq 700\text{ см}$, пояс на слябе k + 1	В (i-1)-ой плавке k слябов с длиной $ХМД^{i-1}$. Сляб (k + 1) с мерной длиной $ХМД^{k+1} = L + 150\text{см}$ (но не менее 507см) идет в брак (переназначение с заказа i-1). Сляб (k + 2) с новой мерной длиной $ХМД^i$ будет первым в i-ой плавке.

Была разработана модель МППР работы УНРС с сухой перековшовкой.

Агенты в модели УНРС используются для выполнения логики работы с заявками (заказами на плавку) и раскроя слябов на границе плавков; операции в модели применяются для визуализации длительности работы элементов УНРС по ручьям. Агент раскроя слябов реализуется алгоритм раскроя слябов в зависимости от значения параметра L , типа переход на границах плавков и наличия признака сухой перековшовки для текущей плавки. Работу модели раскроя слябов условно можно разделить на работу трех блоков: 1) блок описания состояний стальной ванны/проковши, включающий описание разлива стали из стальной ванны, наполнение проковши сталью из стальной ванны, разлива стали из проковши, разворот поворотного стенда со стальной ванной и одновременное продолжение разлива стали из проковши; 2) блок описания работы элементов УНРС — кристаллизатора, зоны вторичного охлаждения и газорезки — по каждому из двух ручьев УНРС; 3) блок описания генерации и удаления заявок (рис. 3.7).

Рисунок 3.7 – Структура модели сухой перековшовки УНРС

Разработанная имитационная модель работы УНРС применялась для решения задачи определения эффективной последовательности подаваемых плавков с целью увеличения числа N слэбов, отправленных в заказ без брака и переназначений в серии, состоящей из 25 плавков.

Для решения поставленной задачи был применен метод планирования с использованием эволюционно-имитационного поиска. Для проведения эволюционного поиска в качестве альтернативных решений были заданы различные перестановки очередности подачи 25 плавков, закодированные в битовые хромосомы. В качестве критерия эффективности отдельного решения-хромосомы был выбран критерий максимизации числа слэбов N , рассчитываемый с помощью имитационной модели.

В результате проведения эволюционно-имитационного эксперимента было сформировано 10 поколений хромосом, в каждом из которых присутствовало 6 хромосом-решений. Далее были взяты решения последнего поколения (решение P1 – решение P6), эффективности которых приведены на рис. 3.8.

Рисунок 3.8 – Сравнение эффективности решений задачи

Решение Р1 характеризуется группировкой плавков перед подачей на УНРС в зависимости от марки стали и требования сухой перековшовки в следующей последовательности групп: А-В-А_п-В_п. При указании марки стали буква «А» означает сталь высокого качества, буква «В» — сталь низкого качества, индекс «П» свидетельствует о наличии требования сухой перековшовки. Решение Р2 характеризуется последовательностью групп А-А_п-В-В_п, решение Р3 — В-В_п-А_п-А, решение Р4 — В-В_п-А-А_п, решение Р5 — А_п-А-В_п-В, решение Р6 — А_п-А-В-В_п. Также на рис. 3.8 представлены эффективность базового решения Р0, соответствующего порядку подачи плавков на УНРС согласно таблице 3.6, и эффективности решений Р7 и Р8, связанных с порядком расположения плавков согласно увеличению и уменьшению ХМД соответственно вне зависимости от марки стали.

Как следует из рисунка, решения с лучшим результатом — Р2 и Р5 — характеризуются подачей на УНРС сначала плавков из высококачественной стали, при этом последовательность плавков не зависит от наличия у них требований по сухой перековшовке или длине мерной заготовки.

Таким образом, при решении с помощью метода анализа и синтеза МППР задачи определения эффективной последовательности подачи плавков на УНРС определены узкие места процесса разлива плавки на УНРС, связанные с наличием требования по сухой перековшовке для отдельных типов плавков. Были выработаны практические рекомендации в зависимости от качества стали, мерной длины готовых слабов и требований по сухой перековшовке, обеспечивающие максимальное количество слабов, отправленных в заказ без брака и переназначений в серии, состоящей из 25 плавков. Полученные рекомендации согласуются с наблюдениями технологов.

3.4 Планирование процесса управления кранами на конвертерном производстве

Рассмотрим планирование процесса управления кранами на конвертерном производстве с целью снижения простоев стальной ковше перед разливкой на УНРС, простои которых приводят к необходимости дополнительного разогрева плавков и переналадке оборудования, что повышает расходы и снижает качество продукции.

Рассмотрим алгоритм суточной смены работы конвертерного цеха. Решение логистической задачи перемещения ковше кранами

в конвертерном цехе может быть эффективно найдено с использование дискретно-событийной модели [70]. Имитационная модель конвертерного цеха была реализована в среде имитационного моделирования AnyLogic 7 [71] и модуле создания моделей процессов автоматизированной системы выпуска металлургической продукции (АС ВМП) [72-73].

Было рассмотрено конвертерное производство, включающее в себя следующие агрегаты: три конвертера и пять машин УНРС. Движение плавков между цехами осуществляется с помощью сталевозов. В перемещении плавков вдоль цеха разливки конвертерной стали (ЦРКС) участвуют краны № 27, 28, 29; они осуществляют снятие плавков со сталевозов, поднятие плавков на УНРС и снятие пустых стальной после разливки на УНРС [74-75].

Имитационная модель конвертерного производства позволяет оценить два алгоритма работы кранов:

1) каждый кран обслуживает строго закрепленные за ним агрегаты УНРС;

2) кран обслуживает агрегат УНРС в зависимости от своего текущего местоположения и близости к агрегату, требующему обслуживания.

Оценку качества алгоритмов необходимо проводить по циклограмме загрузки кранов: графику изменения пройденного расстояния краном в метрах относительно начальной точки. На основе такой оценки целесообразно выбирать вариант работы кранов, приводящий к равномерной загрузке кранов и устранению простоя стальной перед разливкой, а также недопущению остановки работы УНРС вследствие ожидания стальной с новой плавкой.

Для моделирования работы конвертерного цеха в системе AnyLogic 7 была построена модель перемещения стальной с металлом в цехах конвертерного производства в рамках выполнения суточного плана из 50 заказов (плавков), шаг модели равен 1 минуте. При моделировании работы конвертеров был учтен порядок выполнения операций и их продолжительности, а также наличие конкуренции за ресурсы между агрегатами.

Алгоритм управления 1 – Каждый кран ЦРКС обслуживает строго закрепленные за ним агрегаты УНРС. Было рассмотрено несколько вариантов модели, реализующих разные алгоритмы работы оборудования, когда каждый кран обслуживает строго закрепленные

за ним агрегаты УНРС. Захват УНРС для проведения разливки происходит в соответствии с выбранным порядком приоритетов — если один ресурс не доступен, выбирается ресурс из следующего набора и т.д. Для моделирования работы УНРС используется 2 вида ресурсов — места для установки ковшей на УНРС (по 2 шт. на УНРС) и позиция (операция) разливки стали по одной на каждую УНРС. После установки ковшей на УНРС происходит захват ресурса «Разливка стали»; при наличии свободного ресурса в блоке сервиса начинается операция разлива стали. По окончании разливки высвобождается ресурс «Разливка стали» и одно место под ковш на УНРС.

Алгоритм управления 2 — Кран ЦРКС обслуживает агрегат УНРС в зависимости от своего текущего местоположения и близости к агрегату, требующему обслуживания. На рис. 3.9 приведена схема работы цеха в случае реализации алгоритма 2 управления кранами в модели.

Рисунок 3.9 — Блок распределения ковшей с кранов ЦРКС на УНРС для 2-го варианта в системе AnyLogic

Схема приведена для наиболее эффективного варианта управления кранами, исключающего ситуации взаимной блокировки при движении кранов. Порядок следования приоритетов обслуживания кранов определяется близостью к текущей точке и точке «базового» сталевоза. Из схемы видно, что выделено определенное количество направлений следования ковшей, это связано с отсутствием загрузки УНРС, находящихся в противоположных от конвертеров частях цеха.

Было проведено сравнение двух алгоритмов управления кранами ЦРКС. На рис. 3.10 приведен общий путь, пройденный каждым краном в течение суток, для алгоритмов управления кранами 1 и 2. При использовании алгоритма с закреплением кранов за агрегатами общий объем перемещения кранов существенно больше (достигает 3800 метров), чем для второго алгоритма (до 2600 метров).

Рисунок 3.10 – Общий путь в метрах, пройденный каждым краном в течение суток по результатам моделирования в системе AnyLogic

На рис. 3.11 приведено общее время ожидания ковшей в очередях на разливку на каждой УНРС для алгоритмов управления кранами 1 и 2. Общее время ожидания ковшей оказывается существенно ниже для второго алгоритма управления кранами (до 550 минут), чем для первого (до 1100 минут).

Таким образом, можно сделать вывод о предпочтительности второго алгоритма управления кранами.

Рисунок 3.11 – Общее время ожидания ковшей разливки на каждой УНРС в минутах по результатам моделирования в системе AnyLogic

На рис. 3.12 представлена структура модели движения кранов конвертерного производства, разработанной в модуле создания процессов предприятия АС ВМП. Агенты в модели используются для осуществления логики работы с заявками (стальковшами с металлом), распределения заявок между УНРС и подсчета передвижения стальковшей; операции в модели применяются для визуализации длительности работы элементов конвертерного производства. В модели движения кранов применяется четыре заявки. Заявка z_1 «Стальковш с металлом» является основной заявкой, которая применяется для реализации логики работы модели и представляет собой заказ на разливку плавки на УНРС. Заявки z_2 , z_3 и z_4 «Перемещение крана 27», «Перемещение крана 28» и «Перемещение крана 29» применяются для описания логики работы кранов и подсчета пройденного ими расстояния; данные заявки содержат следующие атрибуты: *dist* – накапливает суммарное расстояние, пройденное краном, *location* – хранит информацию о местоположении крана.

Рисунок 3.12 – Структура модели движения кранов в системе АС ВМП

При разработке модели движения кранов было реализовано два алгоритма движения кранов в пределах ЦРКС. В модели алгоритмы реализованы с помощью базы знаний агента «Распределение плавков по УНРС».

Первый алгоритм предполагает, что каждый кран обслуживает строго закрепленные за ним агрегаты УНРС. При его реализации использовался следующий вариант закрепления: кран 29 обслуживает УНРС № 5 и № 4, кран 28 – УНРС № 3 и № 2, кран 27 – УНРС № 1.

Второй алгоритм предполагает, что кран обслуживает агрегат УНРС в зависимости от своего текущего местоположения и близости к агрегату, требующему обслуживания. Для этого в базе знаний агента «Распределение плавков по УНРС» были реализованы следующие ситуации (правила) обслуживания УНРС: кран 29 обслуживает УНРС № 5 и № 4, кран 28 – УНРС № 4, № 3 и № 2, кран 27 – УНРС № 2 и № 1 в зависимости от своего местоположения.

С разработанной моделью движения кранов в модуле оптимизации процессов предприятия (ОПП) АС ВМП были проведены эксперименты по установлению наилучшего алгоритма передвижения кранов с точки зрения оптимизации максимального простоя стальной перед УНРС, простоя УНРС и расстояния, пройденного кранами. На рис. 3.13 представлены графики общего пути в метрах, пройденного кранами в течение суток, для вариантов 1 и 2 передвижения кранов, полученные с помощью модуля ОПП.

Рисунок 3.13 — Общий путь в метрах, пройденный каждым краном в течение суточной смены по результатам моделирования в системе АС ВМП

Как следует из графиков, применение варианта 2 передвижения кранов обеспечивает равномерную загрузку кранов и снижение суммарного пути, пройденного кранами за сутки.

На рис. 3.14 приведено максимальное время ожидания ковшей в очередях на разливку на каждой УНРС для вариантов 1 и 2 передвижения кранов.

Рисунок 3.14 — Максимальное время ожидания ковшей разливки на каждой УНРС в минутах по результатам моделирования в системе АС ВМП

Как следует из графиков, применение варианта 2 передвижения кранов обеспечивает снижение максимального времени простоя стальной ковшей перед разливкой на УНРС на 22 процента: с 44 минут до 34 минут.

Таким образом, в ходе планирования процессов управления кранами на конвертерном производстве были разработаны

имитационные модели передвижения плавок и кранов системах AnyLogic 7.0 и подсистеме моделирования АС ВМП.

Реализация в модели AnyLogic различных алгоритмов движения кранов осуществлялась за счет структурно-параметрического изменения модели. Реализация различных алгоритмов в модели АС ВМП осуществлялась с помощью описания базы знаний агента, управляющего распределением плавок на УНРС. Последний вариант представляется более гибким с точки зрения внесения изменений в существующие алгоритмы движения кранов или расширения модели новыми алгоритмами.

Результаты проведения экспериментов с разработанными моделями в AnyLogic и модуле ОПП АС ВМП согласуются между собой и позволяют сделать следующий вывод об исследуемых процессах. Более гибким является алгоритм планирования управления кранами, при котором кран обслуживает агрегат УНРС в зависимости от своего текущего местоположения и близости к агрегату, требующему обслуживания. Применение данного алгоритма обеспечивает равномерную загрузку кранов, снижение общего пути, пройденного кранами, снижение суммарного и максимального времени простоя стальной перед разливкой на УНРС. Также был сделан вывод о зависимости общего времени простоя стальной от порядка следования заявок на плавку и величины отложенной подачи плавок на конвертеры.

3.5 Планирование логистических процессов электросталеплавильного цеха

Рассмотрим работу электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ). Эффективность работы цеха определяется не только объемом производимой продукции в единицу времени, но и целой совокупностью факторов: средней длительностью обработки единицы продукции в цехе в зависимости от типа маршрута единицы продукции, средней загрузкой агрегатов цеха, средней очередью единиц продукции перед обработкой на агрегатах цеха, числом переназначенных единиц продукции в единицу времени. При исследовании работы ЭСПЦ анализировать перечисленные выше характеристики работы цеха удобно с использованием имитационной модели работы цеха. Применение технологии имитационного моделирования позволяет значительно снизить издержки на этапе различных реконструкций

цеха, а также определить производственные мощности оборудования при различных условиях работы цеха [76]. Разработка имитационной модели логистических процессов ЭСПЦ, влияющих на эффективность работы цеха, представляется актуальной.

Рассмотрим разработку модели работы ЭСПЦ с помощью модуля создания моделей процессов предприятия (СМП) системы АС ВМП [77-80].

Рассмотрим ЭСПЦ, состоящий из следующих агрегатов: одна электродуговая печь (ЭДП), один агрегат доводки стали (АДС), одна установка печь-ковш (УПК) и одна машина УНРС [81]. Обработка на ЭДП идет последовательно и непрерывно согласно порядковым номерам плавов. Всего при обработке на ЭДП плавка проходит 24 операции, при этом возможны 6 видов незапланированных операций (операций-простоев).

Плавка в ЭСПЦ проходит четыре разных маршрута в зависимости от назначения конечной единицы продукции. Условно обозначим данные маршруты буквами.

Маршрут «А» ЭДП-УНРС. Процент плавов с маршрутом ЭДП-УНРС составляет 25,3% от общего числа плавов. Время передвижения плавки между ЭДП и УНРС составляет 4 минуты.

Маршрут «Б» ЭДП-УПК-УНРС. Процент плавов с маршрутом ЭДП-УПК-УНРС составляет 9,7% от общего числа плавов. Время передвижения плавки между ЭДП и УПК составляет 1 минуту. Далее плавка в среднем 4 минуты ожидает обработки на УПК. Затем в порядке очереди (согласно порядковым номерам плавов) плавка обрабатывается на УПК. Время передвижения плавки между УПК и УНРС составляет 2 минуты. Далее плавка обрабатывается на УНРС согласно своему порядковому номеру.

Маршрут «В» ЭДП-АДС-УНРС. Процент плавов с маршрутом ЭДП-АДС-УНРС составляет 38,8% от общего числа плавов. Время передвижения плавки между ЭДП и АДС составляет 2 минуты. Далее плавка в среднем 5 минут ожидает обработки на АДС. Затем в порядке очереди (согласно порядковым номерам плавов) плавка обрабатывается на АДС. Время передвижения плавки между АДС и УНРС составляет 2 минуты. Далее плавка обрабатывается на УНРС согласно своему порядковому номеру.

Маршрут «Д» ЭДП-УПК-АДС-УНРС. Процент плавов с маршрутом ЭДП-УПК-АДС-УНРС составляет 26,2% от общего числа

плавков. Время передвижения плавки между ЭДП и УПК составляет 1 минуту. Далее плавка в среднем 4 минуты ожидает обработки на УПК. Затем в порядке очереди (согласно порядковым номерам плавков) плавка обрабатывается на УПК. Время передвижения плавки между УПК и АДС составляет 1 минуту. Далее плавка в среднем 5 минут ожидает обработки на АДС. Затем в порядке очереди плавка обрабатывается на АДС. Время передвижения плавки между АДС и УНРС составляет 2 минуты. Далее плавка обрабатывается на УНРС согласно своему порядковому номеру.

Обработка на УПК. Обработка идет согласно очереди на обработку, которая формируется исходя из порядковых номеров плавков. 1 % плавков подвергается повторной обработке на УПК, при этом подобная плавка после первичной обработки на УПК встает в общую очередь плавков для обработки на УПК последней. 4,5 % плавков после обработки на УПК переназначаются.

Обработка на АДС. Обработка идет согласно очереди на обработку, которая формируется исходя из порядковых номеров плавков. 1 % плавков подвергается повторной обработке на АДС, при этом подобная плавка после первичной обработки на АДС встает в общую очередь плавков для обработки на АДС.

Разливка на УНРС. Разливка идет согласно очереди на обработку, которая формируется исходя из порядковых номеров плавков. УНРС работает непрерывно. Поскольку плавки на УНРС обрабатываются последовательно согласно их порядковому номеру, то текущая плавка ждет обработки на УНРС до тех пор, пока не будут разлиты все плавки.

Задание на оптимизацию процессов формулируется следующим образом: необходимо провести моделирование работы ЭСПЦ в течение 10 дней в режиме 24 часа в сутки. Найти наилучшие значения выходных характеристик работы цеха в зависимости от следующих входных условий:

I. Плавки подаются на обработку ЭДП вперемешку вне зависимости от маршрута прохождения (базовый эксперимент).

II. Плавки перед подачей на ЭДП группируются по 20 плавков с одинаковым маршрутом. Последовательность маршрутов: А-Б-В-Д.

III. Плавки перед подачей на ЭДП группируются по 20 плавков с одинаковым маршрутом. Последовательность маршрутов: Д-В-Б-А.

IV. Плавки перед подачей на ЭДП группируются по 20 плавков с одинаковым маршрутом. Последовательность маршрутов: В-А-Б-Д.

V. Плавки перед подачей на ЭДП группируются по 40 плавков с одинаковым маршрутом. Последовательность маршрутов: А-Б-В-Д.

VI. Плавки перед подачей на ЭДП группируются по 40 плавков с одинаковым маршрутом. Последовательность маршрутов: Д-В-Б-А.

VII. Плавки перед подачей на ЭДП группируются по 40 плавков с одинаковым маршрутом. Последовательность маршрутов: В-А-Б-Д.

На рис. 3.15 (вверху) представлена структура модели работы ЭСПЦ в модуле СМП.

Агенты в модели электросталеплавильного цеха используются для осуществления логики работы с заявками (плавками), определения маршрута, настройки эксперимента и создания вероятности наступления какого-либо события; операции в модели применяются для визуализации длительности работы элементов электросталеплавильного цеха, реализации очередей и подсчета параметров эксперимента. В модели электросталеплавильного цеха используется 1 тип заявки. Заявка z1 “Плавка” используется для описания логики работы электросталеплавильного цеха и для сбора данных по каждому устройству цеха. После прохождения установленного рабочего цикла заявка удаляется. Работу модели ЭСПЦ условно можно разделить на работу четырёх блоков: 1) блок описания работы ЭДП, включающий описание ЭДП и процесса выбора маршрута для плавки; 2) блок описания работы установки печь-ковш; 3) блок описания работы АДС; 4) блок описания работы УНРС, включающий в себя процесс удаления заявок.

В данной модели при обработке на ЭДП плавка проходит 24 операции, при этом возможны 6 видов простоев. Выполнение данных операций в модели реализовано в декомпозиции узла ЭДП. На рисунке 3.15 (внизу) изображена структура декомпозиции данного узла. Агенты, в приведенной выше структуре, используются для определения возникновения простоя в зависимости от вероятности, а также для присвоения новой вероятности для последующего простоя. Распределение плавков по различным маршрутам осуществляется с помощью агента «Определение маршрута» (см. рис. 3.15, верхняя структура). Алгоритм распределения описывается с помощью продукционных правил «Если, ... То» (рис. 3.16).

Для проведения экспериментов был использован агент «Эксперименты», который, в зависимости от номера эксперимента, изменял необходимые настройки (количество плавок в группе и порядковый номер маршрута).

Рассмотрим проведение экспериментов с разработанной моделью ЭСПЦ в модуле ОПП системы АС ВМП. Дискрет времени моделирования был выбран 1 минута за такт, следовательно, для моделирования работы цеха в течение 10 дней в режиме 24 часа в сутки имитационный эксперимент проводился в течение 14400 тактов.

По окончании имитации модели с исходными данными был построен подробный отчёт в формате .csv, содержащий детальную информацию об изменении значений всех параметров модели с течением модельного времени. С помощью данного отчета были построены графики выполнения базового эксперимента, представленные на рис. 3.17.

Рисунок 3.17 – Результаты моделирования для базового эксперимента

Как следует из анализа рис. 3.17, наиболее существенные очереди плавок возникают перед обработкой на УНРС; очереди перед обработкой на АДС и УПК не превышают единицы.

Для определения наиболее эффективного способа работы ЭСПЦ необходимо определить такой порядок подачи плавок, при котором количество разлитых плавок будет наибольшим и значения выходных характеристик работы цеха будут оптимальными. Для этого в модуле ОПП АС ВМП был построен и выполнен план экспериментов, заданный в постановке задачи (рис. 3.18). В качестве выходных характеристик работы цеха были выбраны следующие: количество разлитых плавок, средние времена ожидания плавкой обработки на УНРС

Наименование: Привязка:

Параметры

Наименование параметра	Тип параметра	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	
Номер эксперимента	Переменная	1	2	3	4	5	6	7	
Кол-во разлитых плавок	Выход	163	163	162	164	164	162	163	
Очередь на МН/З	Выход	2,26	1,62	4,15	3,84	1,37	2,17	1,61	
Время обработки плашки А	Выход	401,56	295,21	659,48	528	288,12	529,33	300,33	
Время обработки плашки Б	Выход	439,83	369,1	615,13	581,58	298,86	421,9	389,95	
Время обработки плашки В	Выход	431,75	381,03	570,03	466,42	263,23	379,55	356,73	

По результатам выполненных экспериментов был сделан следующий вывод: экспериментом с лучшим результатом является эксперимент под номером 5. В данном эксперименте количество разлитых плавков является одним из наибольших, кроме того, для данного эксперимента наблюдается снижение среднего времени обработки плавки в ЭСПЦ на 18-26 процентов в зависимости от типа маршрута плавки. Снижение среднего времени обработки плавки обусловлено снижением для эксперимента № 5 среднего времени ожидания плавкой обработки на УНРС за счет снижения очереди плавков перед УНРС (рис. 3.19). Среднее время ожидания плавкой обработки на УНРС для эксперимента № 5 не превышает 15 минут.

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что наилучшая эффективность работы ЭСЦП достигается при группировке плавков перед подачей на ЭДП по 40 плавков с одинаковым маршрутом и при использовании следующей последовательности маршрутов плавков: ЭДП-УНРС, ЭДП-УПК-УНРС, ЭДП-АДС-УНРС, ЭДП-УПК-АДС-УНРС.

Таким образом, в ходе решения задачи планирования логистических процессов в цехе ЭСПЦ был применен метод планирования экспериментов с имитационной моделью работы цеха.

В результате построения и выполнения в модуле оптимизации процессов предприятия АС ВМП плана экспериментов были получены следующие выводы. При использовании группировок плавков на входе ЭСПЦ уменьшается среднее время нахождения плавки в очереди перед УНРС и, соответственно, среднее время обработки плавки в ЭСПЦ; остальные выходные показатели работы цеха меняются незначительно. По результатам анализа экспериментов с имитационной моделью ЭСПЦ были предложены рекомендации, позволяющие повысить производительность работы ЭСПЦ.

3.6 Планирование логистических процессов конвертерного производства

В рамках исследования логистических процессов конвертерного производства (КП) была разработана имитационная модель работы транспортной системы конвертерного цеха (далее модель движения плавки) с целью решения проблемы планирования логистических процессов КП. Разработка модели движения плавки была проведена с помощью подсистемы моделирования системы АС ВМП.

Данные об анализируемых процессах были собраны с помощью датчиков АСУ ТП, расположенных в цехах КП. Данные содержат информацию о передвижении единиц продукции в рамках КП по цехам выплавки стали (ЦВС), подготовки сталь-ковшей (ЦПК), внепечной обработки стали (ЦВОКС) и разливки стали ЦРКС.

КП включает в себя следующие агрегаты: три конвертера (К), три установки доводки металла (УДМ), три УНРС. На рис. 3.20 приведена схема расположения агрегатов и транспортных средств КП. Маршрут прохождения плавки по агрегатам и времена обработки должны совпадать с реальным планом на производстве.

Рисунок 3.20 — Схема расположения агрегатов и транспорта КП

Рассмотрим прохождение одной плавкой стандартного технологического пути Конвертер — УДМ — УНРС. В таблице 3.7 представлена последовательность действий при прохождении плавкой данного маршрута с точки зрения транспортных агрегатов. Следует отметить, что прохождение плавкой агрегатов «Конвертер» и «УДМ» автоматически закрепляет за плавкой соответствующие текущие пути движения сталевозов (см. рис. 3.20).

Опишем целевую функцию задачи. Пусть T_i — среднее время простоя стальной в ЦРКС в ожидании разлива на УНРС в минутах, i — номер УНРС. Целевая функция примет вид:

$$F = \sum_{i=1}^3 T_i \rightarrow \min. \quad (3.7)$$

Необходимо также учитывать требование по недопущению остановки работы УНРС вследствие отсутствия очередного стальной в ЦРКС для разлива. Стальной может находиться на поворотном стенде УНРС в ожидании обслуживания его агрегатом не более 15 минут, в противном случае сталь в ковше остынет и не разольется. Необходимо предложить варианты отложенной подачи плавки на конвертер 1, обеспечивающей оптимизацию целевой функции (3.7). Работу КП будем анализировать в течение 200 минут.

Таблица 3.7

Алгоритм работы транспортных средств КП

Наименование средства	Основной параметр	Последовательность действий
Сталевоз ЦВС / ЦПК	$v_c = 50$ м/мин	<ol style="list-style-type: none"> 1) Начать работу на линии (по окончании слива стали с конвертера); 2) двигаться под кран; 3) остановиться под краном; 4) ожидать снятия стальной ванны краном 23; 5) вернуться к конвертеру; 6) завершить работу.
Сталевоз ЦВОКС	$v_c = 50$ м/мин	<ol style="list-style-type: none"> 1) Начать работу на линии (с началом работы сталевоза 7.X в ЦВС); 2) двигаться в ЦРКС; 3) ожидать снятия стальной ванны со сталевоза 7.X; 4) вернуться под кран 23 в ЦВОКС; 5) ожидать погрузку стальной ванны с плавкой; 6) двигаться под УДМ; 7) ожидать конца обработки на УДМ; 8) двигаться в ЦРКС; 9) ожидать снятия стальной ванны краном 27; 5) вернуться в ЦВОКС; 6) завершить работу.
Кран 23 ЦВОКС	$v_{\text{кран}} = 64$ м/мин $v_{\text{телега}} = 22,7$ м/мин	<ol style="list-style-type: none"> 1) Начать работу (с приходом сталевоза 7.X в ЦВОКС со стальной ванной); 2) двигаться к подошедшему сталевозу; 3) поднять краном стальную ванну; 4) двигаться к свободному агрегату УДМ; 6) ожидать прихода сталевоза 6.X из ЦРКС; 7) установить краном стальную ванну на сталевоз 6.X; 8) вернуться на место и завершить работу.
Кран 27 ЦРКС	$v_{\text{кран}} = 64$ м/мин $v_{\text{телега}} = 22,7$ м/мин	<ol style="list-style-type: none"> 1) Начать работу (с приходом сталевоза 6.X в ЦРКС со стальной ванной); 2) двигаться к подошедшему сталевозу; 3) поднять краном стальную ванну; 4) двигаться к нужному УНРС; 6) сдвинуть телегу крана с плавкой; 7) поставить стальную ванну на поворотный стенд УНРС 8) вернуться на место и завершить работу.

На рис. 3.21 приведен фрагмент модели движения плавки в конвертерном цехе в нотации МППР модуля СМП системы АС ВМП.

Рисунок 3.21 – Фрагмент модели движения плавки в модуле СМП АС ВМП

Нотация МППР предполагает, что узлы модели могут быть представлены в виде функциональных блоков или агентов, выступающих регуляторами процессов и имеющих наборы правил. В данном случае в используемых агентах с помощью трех видов заявок описаны все необходимые параметры плавки, механизмы регулирования движения транспортных средств и обработка конфликтных ситуаций.

Заявка z1 «Заявка на обработку металла» является основной заявкой, которая определяет маршрут следования плавки, время обработки плавки на агрегатах и этап, на котором находится сейчас плавка. Заявка z1 проходит через всю модель согласно технологическому маршруту плавки. Заявки z2 и z4 «Заявка на работу сталеразливочного ковшика» и «Заявка на работу крана» регулируют работу транспортных средств и применяются для описания логики работы кранов и сталеразливочных ковшиков в модели.

Работу модели движения плавки условно можно разделить на работу семи блоков:

- 1) блок генерации заявок, включающий создание заявки и определение времени ее генерации;

- 2) блок описания работы конвертеров — операций подготовки, продувки, работы после продувки и слива стали;

3) блок описания работы сталевозов ЦВС и ЦВОКС – движение по линии, очерёдность работы и взаимодействие с кранами, создание и удаление заявки;

4) блок описания работы элементов УДМ – обработка исключений при возникновении новой плавки на линии сталевоза 6.1.1;

5) блок описания работы крана ЦВОКС – движение по линии, очерёдность работы и взаимодействие со сталевозами, создание и удаление заявки;

6) блок описания работы крана ЦРКС – движение по линии, очерёдность работы и взаимодействие со сталевозами, создание и удаление заявки;

7) блок описания работы элементов УНРС – разворот поворотного стенда и разливка плавки, подсчёт статистики.

В модуле оптимизации процессов АС ВМП были проведена серия экспериментов по нахождению оптимального значения параметра «Отложенная подача плавки на конвертер 1» с точки зрения минимизации времени простоя УНРС без разливки и времени простоя стальной в ожидании разливки на УНРС.

Результаты проведения серии экспериментов представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Результаты проведения экспериментов в модуле ОПП АС ВМП

Номер эксперимента	Входные параметры	Выходные параметры				
	Отложенная подача плавки на конвертер 1, мин	Загрузка К1 %	Загрузка К2 %	Загрузка К3 %	Максимальное время простоя стальной, мин	Максимальное время простоя УНРС, мин
1	5	97,41	94,38	91,40	6,5	1
2	8	92,91	88,38	83,67	0	1
3	11	97,47	91,40	85,32	6,5	1
4	14	97,47	90,00	82,32	6,5	1
5	17	97,47	88,38	79,79	6,5	1
6	20	83,80	78,25	67,71	5,5	1
7	23	79,74	67,68	55,58	1	1
8	26	97,42	83,83	0	0	2
9	29	88,36	76,77	0	0	2

Анализ таблицы 3.8 показал, что лучший результат достигается в эксперименте № 2, поскольку данный эксперимент обеспечивает минимизацию как времени простоя сталковша перед разливкой на УНРС, так и времени простоя УНРС в ожидании очередного сталковша. Оптимальное значение входного параметра анализируемых логистических процессов будет следующим: отложенная подача плавков на конвертер 1 – 8 минут.

Найденное значение отложенной подачи плавков также обеспечивает равномерную загрузку конвертеров (рис. 3.22). Графики, представленные на рис. 3.22, были построены с помощью сформированного в модуле ОПП отчета по результатам выполнения модели. Данный отчет содержит значения переменных модели (ресурсов, средств, операций и агентов) в зависимости от модельного времени.

Рисунок 3.22 – Результаты проведения эксперимента № 2 с моделью движения плавки в модуле ОПП АС ВМП

Таким образом, с помощью методов имитационного мультиагентного моделирования было проведено планирование логистиче-

ских процессов конвертерного производства и получены рекомендации, согласующиеся с экспертными знаниями технологов.

3.7 Планирование логистических процессов цехов горячей и холодной прокатки

В данном исследовании была поставлена задача разработки модели совместной работы двух цехов горячей и холодной прокатки металлургического предприятия и планирования на основе моделирования логистических процессов цехов.

Цех горячей прокатки (ЦГП) включает в себя непрерывный широкополосный стан «2000» горячей прокатки (г.п.), предназначенный для производства горячекатаных полос из углеродистых и низколегированных марок сталей.

В качестве исходной заготовки на стане 2000 используются непрерывнолитые слябы, поступающие со склада отлитых слябов из кислородно-конвертерного цеха. На выходе ЦГП формируются горячекатаные (г/к) рулоны, поступающие на склад г/к рулонов. В состав оборудования стана 2000 г.п. входят: участок нагревательных печей (включает 4 параллельные печи); черновая группа клетей; чистовая группа клетей; уборочная группа (группа моталок).

Цех холодного проката (ЦХП) включает в себя травильное отделение с непрерывно травильным агрегатом (НТА) и прокатный участок. В рамках работы прокатного участка ЦХП рассматривается работа четырехклетевого стана «2500», двухклетевого реверсивного стана и дрессировочного стана «2500». В качестве исходной заготовки в ЦХП используются г/к рулоны, поступающие со склада г/к рулонов. При этом со склада г/к рулонов в ЦХП поступает 43 % хранимой продукции, оставшаяся часть продукции со склада г/к рулонов вывозится в другие цеха каждый час партиями по 10 рулонов.

На выходе ЦХП формируются холоднокатаные (х/к) полосы в рулонах, поступающие на склад. Также ЦХП имеет промежуточные склады, предназначенные для хранения единиц продукции между производимыми технологическими операциями: склад г/к травленных рулонов и склад х/к рулонов.

На рисунке 3.23 представлена схема движения единиц продукции по агрегатам цехов ЦГП и ЦХП.

Рисунок 3.23 – Схема движения единиц продукции по ЦПП и ЦХП

Необходимо определить ключевые параметры для оптимальной работы двух цехов на протяжении трех суток. Параметры, которые необходимо оценить:

- 1) минимальное количество слэбов на складе «Склад слэбов» (см. рис. 3.33) на начало моделирования, обеспечивающее непрерывную подачу слэбов каждые три минуты в нагревательные печи стана 2000 г.п. в течение всего времени моделирования;
- 2) количество объектов на складе «Склад х/к полосы в рулонах» на конец моделирования;
- 3) загрузку всех агрегатов в процентах на конец моделирования.

Для решения данной задачи был использован модуль СМП системы АС ВМП. На рисунке 3.24 представлена структура имитационной модели работы двух цехов в модуле СМП АС ВМП.

Рисунок 3.24 – Структура модели совместной работы двух цехов в АС ВМП

В данной модели используется одна заявка – «Единый объект обработки» (*z1*). Заявка представляет собой объект, который обрабатывается агрегатами. Пользователь может определить ряд атрибутов у заявки и использовать их в модели. На рисунке 3.25 представлены атрибуты заявки «Единый объект обработки»: *z1_bake* – указывает в какую из четырех печей пойдет партия слябов; *z1_camp* – указывает на какой стан (2-клетевой или 4-клетевой) пойдет объект обработки в ЦХП; *z1_howSlab* – несет в себе информацию о том, сколько слябов пошло на данный объект обработки; *z1_timeOutput* – указывает в какое время партия слябов выйдет из печи ЦГП.

Рисунок 3.25 – Атрибуты заявки «Единый объект обработки» (*z1*)

Агент «Пополнение слябов» (см. рисунок 3.24) моделирует пополнение на складе слябов. Каждые 60 минут поступает партия слябов.

Рассмотрим работу ЦГП. Участок нагревательных печей реализован в узле «Печи», в нем обеспечивается подготовка и забор партии слябов для одной из четырех печей: если на складе «Склад слябов» находится достаточное количество слябов, то агент создает

экземпляр заявки $z1$ и устанавливает значения следующих атрибутов: $z1_bake$ — определяет выбор печи; $z1_howSlab$ — определяет, сколько слябов вошло в партию; $z1_camp$ — задает выбор стана.

После установки атрибутов заявки направляются в соответствии со значением атрибута $z1_bake$ в одну из четырех печей: устанавливается атрибут $z1_timeOutput$, вычитается требуемое количество слябов со склада «Склад слябов», увеличивается количество партий в печи, и заявка передается узлу «Обработка». Атрибут $z1_timeOutput$ необходим для определения времени выхода объекта из печи. Выходом объекта из узла «Обработка» занимается агент «Выход». Когда наступает время, в которое объект должен выйти из печи, агент берет этот объект с узла «Обработка» и передает узлу «Черновая группа». Узлы «Черновая группа», «Чистовая группа», «Группа моталок» задерживают заявку на время обработки. Эти узлы работают последовательно.

После обработки в узле «Группа моталок» заявка поступает на склад «Склад г/к рулонов». При этом с данного склада в ЦХП поступает 43% хранимой продукции, оставшаяся часть продукции со склада вывозится в другие цеха каждый час партиями по 10 рулонов.

Рассмотрим работу ЦХП. После обработки в узле «НТА» заявка поступает в узел «Склад г/к травленных рулонов» (см. рисунок 3.34). Далее с узла «Склад г/к травленных рулонов» заявки забирает узел «Станы». Декомпозиция узла «Станы» приведена на рисунке 3.26.

Рисунок 3.26 — Декомпозиция узла «Станы»

Агент «Вход2» обеспечивает забор заявки с узла «Склад г/к травленных рулонов» и, в зависимости от значения атрибута заявки $z1_camp$, передачу заявки узлам «2-клетевой стан» или «4-клетевой

стан» в соответствии с заданными вероятностями. После обработки заявка передается на узел «Склад х/к рулонов».

Далее с узла «Склад х/к рулонов» заявки передаются в узел «Дрессировочный стан». Агент «Вход3» обеспечивает забор заявки с узла «Склад х/к рулонов» и передачу заявки на обработку узлу «Дрессировочный стан1». После обработки заявки в ЦХП она передается на узел «Склад х/к полосы в рулонах».

С целью определения необходимого минимального количества слябов на складе «Склад слябов» на начало моделирования, обеспечивающего непрерывную подачу слябов в печи стана 2000 г.п., был проведен ряд экспериментов на основе построенной имитационной модели. Для каждого эксперимента с целью исключения разброса значений выходных параметров были вычислены средние значения выходных параметров путем прогонки модели пяти раз с одинаковыми входными условиями.

В качестве входного параметра модели был взят параметр «Количество объектов на складе «Склад слябов»». В результате проведения экспериментов с моделью были получены следующие выходные параметры: выход модели; количество объектов на складе «Склад х/к полосы в рулонах»; текущая загрузка агрегатов на конец моделирования; $T_{\text{ожидания}}$ – суммарное время ожидания пополнения склада слябов для загрузки слябов в нагревательные печи стана 2000 в минутах. Выход модели рассчитывается следующим образом:

$$\text{Выход_модели} = iRes2 + \omega \cdot T_{\text{ожидания}} \rightarrow \min, \quad (3.8)$$

где $iRes2$ – количество объектов на складе «Склад слябов» на начало моделирования; ω – штрафной коэффициент, который взят равным 2. Такой подход связан с большим разбросом количества слябов, одновременно пополняющих склад слябов.

Результаты экспериментов представлены в таблице 3.9.

Как следует из анализа таблицы 3.9, значение параметра «Выход модели» уменьшается с увеличением числа слябов на складе «Склад слябов» на начало моделирования. Наилучшие значения параметра «Выхода модели» достигаются в экспериментах № 6 и № 8. Так как необходимо обеспечить непрерывную подачу слябов в печи, то эксперимент № 8 является более подходящим, поскольку у эксперимента № 8 $T_{\text{ожидания}} = 0$ мин, а у эксперимента № 6 $T_{\text{ожидания}} = 11$ мин. Остальные выходные параметры эксперимента № 8 имеют приемлемые значения.

Таблица 3.9

Результаты экспериментов

№ Эксперимента		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Входной параметр	Кол-во объектов на «Склад слябов»	300	360	400	420	440	480	500	520	540
Выходные параметры	Выход модели	774	632	536	548	534	502	526	520	540
	Кол-во объектов на «Склад х/к полосы в рулонах»	556	549	558	557	565	569	560	567	566
	Загрузка узла «Черновая группа», %	62,93	64,61	65,68	65,86	65,95	66,53	66,50	66,67	66,67
	Загрузка узла «Чистовая группа», %	62,94	64,66	65,69	65,86	65,96	66,54	66,51	66,68	66,68
	Загрузка узла «Группамоталок», %	31,46	32,31	32,93	32,92	32,98	33,27	33,25	33,33	33,33
	Загрузка узла «НТА», %	96,31	94,94	96,63	96,44	97,31	98,64	97,17	98,59	98,18
	Загрузка узла «4-клетевой стан», %	92,13	92,30	92,12	92,66	93,37	94,81	93,18	94,11	93,88
	Загрузка узла «ДС», %	68,72	67,77	68,82	82,28	69,25	70,30	69,15	70,21	70,15
	$T_{ожидания}$, мин	237	136	68	64	47	11	13	0	0

Максимальная загрузка агрегатов ЦГП достигается в экспериментах № 8 и № 9, так как в данных экспериментах обеспечивается непрерывная подача слябов в нагревательные печи стана 2000 г.п. ($T_{ожидания} = 0$ мин).

Таким образом, можно сделать вывод, что эксперимент № 8 обеспечивает наилучшие значения выходных параметров имитационной модели работы цехов горячей и холодной прокатки: в данном эксперименте обеспечивается непрерывная подача слябов в печи стана 2000 г.п. и высокая загрузка агрегатов ЦГП и ЦХП.

Таким образом, на основе построенной имитационной мультиагентной модели было проведено планирование логистических процессов цехов горячей и холодной прокатки и определен минимальный объем склада слябов для осуществления непрерывной работы цехов в течение трех суток. Различные алгоритмы движения плав-

ки через агрегаты цеха, согласно технологическому маршруту, были описаны в модели с использованием баз знаний агентов, построенных на продукционных правилах.

Результаты моделирования, полученные в ходе серии экспериментов, подтверждают актуальность применения технологии мульти-агентного имитационного моделирования на крупных и средних промышленных предприятиях, в том числе, металлургического профиля.

3.8 Выводы

Полученные теоретические результаты, реализованные в системе поддержки принятия решений BPsim и подсистеме моделирования автоматизированной системы выпуска металлургической продукции, прошли апробацию при решении практических задач планирования организационных и логистических процессов проектной организации и металлургического предприятия, что подтвердило правильность и обоснованность разработанных положений и выводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований поставлена задача планирования работ с учетом неполноты исходной информации и многокритериальности используемой целевой функции.

Проведен анализ существующих методов планирования, в результате которого сделан вывод о наличии недостатков существующих методов планирования, связанных с отсутствием учета неполноты исходной информации, многокритериальности целевой функции, учета складываемых и нескладываемых ресурсов. Указанные ограничения свидетельствуют об актуальности разработки гибридного метода планирования на основе интеграции имитационного, эволюционного моделирования и численных методов оптимизации.

Разработан метод планирования в условиях неполноты исходной информации, в основе которого лежит метод имитационно-эволюционного поиска решения задачи планирования, интегрированный с численными методами снятия неполноты исходной информации и многокритериальности. Новый метод планирования может быть применен для построения календарного плана с учетом временных ограничений, ограниченных складываемых и нескладываемых ресурсов и снижения затрат на субподрядные ресурсы.

Разработана информационная технология планирования, интегрированная с программным комплексом BPsim и подсистемой моделирования автоматизированной системы выпуска металлургической продукции.

Описано применение технологии в проектной организации ЗАО «Телесистемы» для построения календарного плана работ с учетом неполноты исходной информации, связанной с вероятностным заданием числа проектов на горизонте планирования. Приведено описание применения метода планирования и технологии имитационного мультиагентного моделирования для решения задач планирования технологических, логистических и организационных процессов на металлургическом предприятии.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АДС	Агрегат доводки стали
АС ВМП	Автоматизированная система выпуска металлургической продукции
ГА	Генетический алгоритм
ГМД	Горячая мерная длина сляба
ГОО	Группа обслуживания оборудования
ГОТС	Группа обслуживания телекоммуникационных систем
ГП	Горячая прокатка
КП	Конвертерное производство
ЛПР	Лицо, принимающее решения
МППР	Мультиагентные процессы преобразования ресурсов
НТА	Непрерывно-травильный агрегат
ОПП	Оптимизация процессов предприятия (модуль)
ОТС	Организационно-технические системы
ПВ	Потребности-возможности
СМП	Создание модели процессов (модуль)
УДМ	Устройство доводки металла
УНРС	Устройство непрерывной разливки стали
УПК	Установка печь-ковш
ХМД	Холодная мерная длина сляба
ХП	Холодная прокатка
ЦВОКС	Цех внепечной обработки стали
ЦВС	Цех выплавки стали
ЦГП	Цех горячей прокатки
ЦПК	Цех подготовки стальной ковше
ЦРКС	Цех разливки конвертерной стали
ЦХП	Цех холодной прокатки
ЭДП	Электродуговая печь
ЭСПЦ	Электросталеплавильный цех

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Згуровский М.З. Методология построения эффективного решения многоэтапных задач календарного планирования на основе принципа иерархии и комплекса взаимосвязанных моделей и методов / М.З. Згуровский, А.А. Павлов, Е.Б. Мисбра, О.В. Мельников // Вісник НТУУ “КПІ”. Інформатика, управління та обчислювальна техніка. К.: “БЕК+”. – № 50. – 2010.

2. Sriprasert E. Genetic algorithms for multi-constrained scheduling: an application for the construction industry / E. Sriprasert, N. Dawood // Proceedings of CIB W78's 20th International Conf. Construction IT, Construction IT Bridging the Distance, CIB Report 284, Waiheke Island, New Zealand, 23–25 April, 2003. – pp. 341–353.

3. He Julin Construction project scheduling problem with uncertain resource constraints / Julin He, Zhong-Ping Wan // Journal of Construction Engineering and Management ASCE. – 2002. – Vol. 15. – No. 1. – pp. 324–326.

4. Клейменова Е.М. Система оперативного распределения ресурсов при управлении проектами создания и эксплуатации образцов новой техники и ее применение на предприятиях аэрокосмической отрасли / Е.М. Клейменова: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Самара. – 2013. – 20 с.

5. Xu J. Multimode resource-constrained multiple project scheduling problem under fuzzy random environment and its application to a large scale hydropower construction project / J. Xu, C. Feng // The Scientific World Journal. – 2014.

6. Johnson S.M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included / S.M. Johnson // Nav. res. log. quart. – 1954. – Vol. 1 (1). – pp. 61–68.

7. Pritsker A. GERT: graphical evaluation and review technique – Part I / A. Pritsker, W. Happ // Fundamentals, J. Ind. Eng. – 1966. – No. 5. – pp. 267–274.

8. Csebfalvi A. A unified model for resource constrained project scheduling problem with uncertain activity durations / A. Csebfalvi // International Journal of Optimization in Civil Engineering. – 2012. – Vol. 2. – No. 3. – pp. 341–355.

9. Artigues C. Robust optimization for resource-constrained project scheduling with uncertain activity durations / C. Artigues, R. Leu, F.T. Nobibon // *Flexible Services and Manufacturing Journal*. – 2013. – Vol. 25. – No. 1&2. – pp. 175–205.

10. Chen W.-N. Scheduling multi-mode projects under uncertainty to optimize cash flows: a Monte Carlo ant colony system approach / Wei-Neng Chen and Jun Zhang // *Journal of Computer Science and Technology*. – 2012. – Vol. 27. – No. 5. – pp. 950–965.

11. Исследование операций: В 2-х томах. Пер. с англ. / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир. – 1981. – 677 с.

12. Ван Кай Разработка и применение метода реинжиниринга бизнес-процессов на основе мультиагентного моделирования / Кай Ван: дис. ... к.т.н.: 05.13.10. / Новосибирск. – 2013. – 207 с.

13. Мышенков К.С. Метод решения задачи календарного планирования ремонтов технологического оборудования предприятия с использованием генетического алгоритма [Электронный ресурс] / К.С. Мышенков, А.Ю. Романов // *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/212208.html>.

14. Klimek M. A genetic algorithm for the project scheduling with the resource constraints / M. Klimek // *Annals UMCS Informatica*. – 2010. – Vol. 10 (1). – pp. 117–130.

15. Sriprasert E. Genetic algorithms for multi-constrained scheduling: an application for the construction industry / E. Sriprasert, N. Dawood // *Proceedings of CIB W78's 20th International Conf. Construction IT, Construction IT Bridging the Distance, CIB Report 284, Waiheke Island, New Zealand, 23–25 April, 2003*. – pp. 341–353.

16. Abdel-Khalek H. Financing – scheduling optimization for construction projects by using genetic algorithms / H. Abdel-Khalek, M.H. Sherif, A.M. el-Lacany, Y. Abdel-Magd // *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. – 2011. – pp. 289–297.

17. Karova M. A genetic algorithm for project planning problem / M. Karova, J. Petkova, V. Smarkov // *Proceedings of Int. Scientific Conf. Computer Science*. – 2008. – pp. 647–651.

18. Osaba E. Simulation tool based on a memetic algorithm to solve a real instance of a dynamic TSP / E. Osaba, R. Carballedo, F. Diaz // *Proceedings of IASTED Int. Conf. Applied Simulation and Modelling, Napoli, Italy, 25–27 June, 2012*. – pp. 27–33.

-
19. Dhingra A. A bi-criteria M-machine SDST flow shop scheduling using modified heuristic genetic algorithm / A. Dhingra, P. Chandna // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. — 2010. — Vol. 2. — No. 5. — pp. 216–225.
20. Yang F.-C A genetic algorithm based method for creating impartial work schedules for nurses / F.-C. Yang, W.-T. Wu // *International Journal of Electronic Business Management*. — 2012. — Vol. 10. — No. 3. — pp. 182–193.
21. Brezuliani A. A genetic algorithm approach for scheduling of resources in well-services companies / A. Brezuliani, L. Fira, M. Fira // *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*. — Vol. 1. — No. 5. — 2012.
22. Okada I. A random key-based genetic algorithm approach for resource-constrained project scheduling problem with multiple modes / I. Okada, X. F. Zhang, H. Y. Yang, S. Fujimura // *Proc. Int. MultiConf. Engineers and Computer Scientists, Hong Kong, 17–19 March*. — 2010.
23. Zhang X. A new uncertain programming model for project scheduling problem / Xingfang Zhang, Xiaowei Chen // *An International Interdisciplinary Journal*. — 2012. — Vol. 15. — No. 10. — pp. 1–10.
24. Chen M.-Y. Evaluating subcontractor performance using evolutionary fuzzy hybrid neural network / M.-Y. Chen, H.-C. Tsai, E. Sudjono // *International Journal of Project Management*. — 2001. — pp. 349–356.
25. Захаров Н.Ю. Разработка целевой функции оптимального планирования повышения квалификации сотрудников ВУЗа / Н.Ю. Захаров, А.Н. Полетайкин, В.С. Канев // *Труды 12-й Международной Азиатской школы-семинара. Под редакцией С.И. Кабанихина, А.В. Кельманова, А.С. Родионова*. — 2016. — с. 216–221.
26. Brcic M. Resource constrained project scheduling under uncertainty: a survey / M. Brcic, D. Kalpik, K. Fertalj // *Proc. Central European Conference on Information and Intelligent Systems, Varazdin, Croatia, September 19–21, 2012*. — pp. 401–409.
27. Keller B. Scheduling jobs sharing multiple resources under uncertainty: a stochastic programming approach / B. Keller, G. Bayraksan // *IEEE Transactions*. — 2009. — Vol. 42. — No. 1. — pp. 16–30.
28. Емельянов В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / Емельянов В. В., Курейчик В.М., Курейчик В.В. — М.: ФИЗМАТЛИТ. — 2003. — 432 с.
29. Pinedo M.L. Scheduling: theory, algorithms, and systems. Third edition. — Springer. — 2008.

30. Pinedo M.L. Planning and scheduling in manufacturing and services. – Springer. – 2005.

31. Танаев В.С. Введение в теорию расписаний / В.С. Танаев, В.В. Шкурба. – М.: Наука. – 1975. – 256 с.

32. Танаев В.С. Теория расписаний. Одностадийные системы / В.С. Танаев, В.С. Гордон, Я.М. Шафранский. – М.: Наука. – 1984. – 384 с.

33. Мезенцев Ю.А. Эффективный параметрический алгоритм оптимизации расписаний параллельных систем с заданным расписанием начала обслуживания / Ю.А. Мезенцев, И.В. Эстрайх // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 87–106.

34. Мезенцев Ю.А. Прикладные задачи и алгоритмы оптимизации расписаний параллельных обслуживающих систем / Ю.А. Мезенцев // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 1 (62). – С. 49–73.

35. Antonova A. An imitation and heuristic method for scheduling with subcontracted resources / A. Antonova, K. Aksyonov, O. Aksyonova // Mathematics 2021, 9, 2098.

36. Андрейчиков А.В. Интеллектуальные информационные системы / А. В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. М.: Финансы и статистика. – 2006. – 424 с.

37. Клейменова Е.М. Оперативное распределение ресурсов при управлении проектами НИОКР на промышленном предприятии / Е.М. Клейменова // Материалы 6-й мультikonференции по проблемам управления МКПУ-2013, 30 сентября – 5 октября 2013 г., с. Дивноморское, Геленджик, Россия. Т.3. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. – 2013. – с. 104–109.

38. Клейменова Е.М. Разработка принципов построения многоуровневой мультиагентной системы для управления проектами НИР и ОКР РКК «Энергия» / А.Л. Феоктистов, Е.М. Клейменова, П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин, А.В. Царев, Е.В. Симонова // «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»: Труды XIV Международной конференции. Самара, 22–25 июня 2012 / ИПУСС РАН. – Самара: СНЦ РАН. – 2012. – с. 718–723.

39. Скобелев П.О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений / П.О. Скобелев: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н. – Самара. – 2003. – 35 с.

40. Скобелев П.О. Открытые мультиагентные системы для поддержки процессов принятия решений при управлении предприя-

ями / П.О. Скобелев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2001. — Т.3. — с. 71-19.

41. Skobelev P. Ontology-based open multi-agent systems for adaptive resource management / P. Skobelev, A. Zhilyaev, V. Larukhin, S. Grachev, E. Simonova // Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Valletta, Malta, 22–24 February 2020; pp. 127–135, doi:10.5220/0008896301270135.

42. Guizzi G. Simulation-based performance assessment of a new job-shop dispatching rule for the semi-heterarchical industry 4.0 architecture / G. Guizzi, S. Vespoli, A. Grassi, L. Carmela Santillo // Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC), Orlando, USA, 14–18 December 2020; pp. 1664–1675.

43. Guizzi G. On the open job-shop scheduling problem: a decentralized multi-agent approach for the manufacturing system performance optimization / G. Guizzi, R. Revetria, G. Vanacore, S. Vespoli // Proceedings of the 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples, Italy, 18–20 July 2018; pp. 192–197.

44. Alvandi S. Energy efficiency improvement through optimal batch sizing in job shop / S. Alvandi // Mod. Appl. Sci. 2020, 14, 6–19.

45. Ištoković D. Simulation framework for determining the order and size of the product batches in the flow shop: a case study / D. Ištoković, M. Perinić, S. Doboviček, T. Bazina // Adv. Prod. Eng. Manag. 2019, 14, 166–176.

46. Yu H. Job shop scheduling based on digital twin technology: a survey and an intelligent platform / H. Yu, S. Han, D. Yang, Z. Wang, W. Feng // Hindawi Complex. 2021, 1–12.

47. Biruk S. Minimizing project cost by integrating subcontractor selection decisions with scheduling / S. Biruk, P. Jaśkowski, A. Czarnigowska // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2017, 245, 072007.

48. Советов Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов. 3-е изд. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. М.: Высш. шк. — 2001. — 343 с.

49. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. — М.: Машиностроение. — 1979. — 432 с.

50. Аксенов К.А. Принципы построения системы имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов BPsim / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов // Материалы первой Всероссийской науч.-практ. конф. «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности

и прикладных разработках»: сборник докладов. Санкт-Петербург: ФГУП ЦНИИ технологии судостроения. – 2003. – Т.1. – с. 36-40.

51. Аксенов К.А. Система имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов // Научные труды IV отчетной конф. молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ: сборник статей. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2003. – Ч.1. – с. 135-136.

52. Aksyonov K. Computer-aided design system of simulation business process model / K.A. Aksyonov, B.I. Klebanov, A.A. Hrenov // Proceedings of the 4th IMACS Symposium on Mathematical Modeling, Austria, Viena University of Technology. – 2003. – pp. 1414-1420.

53. Goncharov E. Genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem / E. Goncharov, V. Leonov // Autom. Remote Control 2017, 78, 1101–1114.

54. Xie L. Scheduling optimization of prefabricated construction projects by genetic algorithm / L. Xie, Y. Chen, R. Chang // Appl. Sci. 2021 11 5531.

55. Курейчик, В. В. Теория эволюционных вычислений / В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, С. И. Родзин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 260 с.

56. Aksyonov K. Multiagent genetic optimisation to solve the project scheduling problem / K. Aksyonov K, A. Antonova // Proceedings of The Eighth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology, Nice, France, July 21-26, 2013. – pp. 237-242.

57. Антонова А.С. Многокритериальное принятие решений в условиях риска на основе интеграции мультиагентного, имитационного, эволюционного моделирования и численных методов [Электронный ресурс] / А.С. Антонова, К.А. Аксенов // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4(2). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1466>.

58. Зинченко, Л.А. Бионические информационные системы и их практические применения / Л.А. Зинченко, В.М. Курейчик, В.Г. Редько. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2011. – 288 с.

59. Антонова А.С. Применение интегрированной методики принятия решений в условиях полной неопределенности к задаче планирования проектных работ / А.С. Антонова, К.А. Аксенов // Материалы шестой Всероссийской научн.-практ. конф. «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД 2013): сборник докладов. – Казань: Академия наук РТ. – 2013. – Т. 1. – с. 93-98.

-
60. Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ. / Науч. Ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. — М.: Издательство ЛКИ. — 2008. — 360 с.
61. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений / И.Г. Черноруцкий. — СПб.: БХВ-Петербург. — 2005. — 416 с.
62. Антонова А.С. Сравнительный анализ методов планирования субподрядных работ [Электронный ресурс] / А.С. Антонова, К.А. Аксенов // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 3. — Режим доступа: www.science-education.ru/117-13388.
63. Aksyonov K. Analysis of Subcontracting Scheduling Methods Based on Modeling / K. Aksyonov, A. Antonova // Proceedings of the 11th European Modelling Symposium on Mathematical Modelling and Computer Simulation (UKSim 2017), Manchester, England, November 20-22, 2017. — pp. 138-141.
64. Aksyonov K. Choice of the scheduling technique taking into account the subcontracting optimization / K. Aksyonov, A. Antonova, N. Goncharova // Proceedings of the 3rd International Symposium on Signal Processing and Intelligent Recognition Systems (SIRS-2017). Springer Verlag. — 2017. — Vol. 678. — pp. 297-304.
65. Aksyonov K. Comparative analysis of subcontracting scheduling methods / K. Aksyonov, A. Antonova, E. Sysoletin // Proceedings of the ICCAN 2017. Springer Verlag. — 2017. — Vol. 710. — pp. 439-448.
66. Aksyonov K. Analysis of Subcontracting Scheduling Methods Based on Modeling / K. Aksyonov, A. Antonova // Proceedings of the 11th European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation (UKSim 2017), Manchester, England, November 20-22, 2017. — pp. 138-141.
67. Antonova A.S. Application of an evolutionary simulation algorithm for solving the problem of parametric synthesis of the resource conversion process / A.S. Antonova, K.A. Aksyonov // Proceedings of the 28th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2018), Sevastopol, Russia, September 9-15, 2018. — Vol. 1. — pp. 443-447.
68. Антонова, А. С. Разработка имитационной модели раскрытия слябов на машине непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс] / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/121-18535>.

69. Application of a models integration module to the cutting slabs problem in a continuous casting machine / K. A. Aksyonov [et al.] // Proceedings of The Tenth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology. – 2015. – P. 65–72.

70. Имитационная модель электросталеплавильного цеха Челябинского металлургического комбината в AnyLogic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.anylogic.ru/case-studies/chelyabinsk-metallurgical-plant-uses-a-simulation-model-electric-furnace-melting-shop>.

71. AnyLogic: официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.anylogic.ru>.

72. Aksyonov K.A. Development of real-time simulation models: integration with enterprise information systems / K.A. Aksyonov, E.A. Bykov, O.P. Aksyonova, A.S. Antonova // Proceedings of ICCGI 2014: The Ninth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology, 22-26 June 2014, Sevilla, pp. 45-50.

73. Aksyonov K.A. Multi-agent approach for the metallurgical enterprise information system development / K.A. Aksyonov, I.A. Spitsina, E.G. Sysoletin, O.P. Aksyonova, E.F. Smolij // 24th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014), 7–13 September 2014, Sevastopol, vol. 1, pp.437-438.

74. Моделирование процессов управления кранами на конвертерном производстве [Электронный ресурс] / Н. А. Бегунов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/121-18539>.

75. Aizatullo, A. M. Analysis and simulation of the cranes control processes for converter production / A. M. Aizatullo, O. P. Aksyonova, A. S. Antonova // Proceedings of the 25th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology». – 2015. – Vol. 1. – P. 295–296.

76. Аксенов, К. А. Анализ работы электросталеплавильного цеха с помощью имитационного моделирования [Электронный ресурс] / К. А. Аксенов, А. С. Антонова, А. М. Айзатулло // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/122-21153>.

77. Блинов, Д. В. Перспективы развития автоматизированных систем управления на металлургических предприятиях уральского региона [Электронный ресурс] / Д. В. Блинов, К. А. Аксенов, А. С. Антонова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – Режим доступа: www.science-education.ru/119-15186.

78. Модуль создания моделей процессов: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / К. А. Аксенов, Е. Г. Сысолетин, Е. Ф. Смолий, С. Д. Ростунцев, А. С. Антонова, С. Б. Белан, М. Д. Дубовик. — № 2015619618; дата регистрации 08.09.2015 г.

79. Модуль подготовки данных: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А. М. Бородин, С. Г. Мирвода, С. В. Поршневу, С. Т. Князев, С. Б. Белан, М. Д. Дубовик, А. С. Антонова, А. А. Шеклеин. — № 20153656; дата регистрации 28.12.2015 г.

80. Модуль оптимизации процессов предприятия: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Д. А. Беренов, К. А. Аксенов, Е. Г. Сысолетин, Е. Ф. Смолий, С. Д. Ростунцев, А. С. Антонова, А. В. Чирышев, С. Б. Белан, М. Д. Дубовик. — № 2015619510; дата регистрации 04.09.2015 г.

81. Aksyonov, K. A. Analysis of the electric arc furnace workshop logistic processes using multiagent simulation / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova, N. V. Goncharova // *Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems*. — 2017. — Vol. 678. — P. 390–397.

82. Антонова А.С., Аксенов К.А. Разработка метода планирования бизнес-процессов на основе имитационно-эволюционного моделирования: монография / А.С. Антонова, К.А. Аксенов. — М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2020. — 160 с. ISBN 978-5-91327-641-4. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44031641>

83. Antonova A.S., Aksyonov K.A., Aksyonova O.P. An imitation and heuristic method for scheduling with subcontracted resources. *Mathematics* 2021, 9(17), 2098; DOI: 10.3390/math9172098 <https://doi.org/10.3390/math9172098>

Научное издание

Антонова Анна Сергеевна
Аксенов Константин Александрович

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
И ПЛАНИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ
НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА**

Монография

Технический редактор Байгузова Л.М.

Подписано в печать 08.12.2021

Бумага офсетная.

Гарнитура NewtonC

Формат 60×84 1/16

Печать трафаретная. Печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Заказ № 041-21.

Отпечатано в типографии ИД «Академия Естествознания»,
440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3