

На правах рукописи

Анн

Антонова Анна Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ НА
ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННО-ЭВОЛЮЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.10 – Управление в социальных и экономических
системах (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ) в департаменте информационных технологий (ИТ) и автоматике.

Научный руководитель: **Аксенов Константин Александрович,**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Мезенцев Юрий Анатольевич,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет», профессор
кафедры Автоматизированных систем
управления

Девятков Тимур Владимирович,
кандидат технических наук,
ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан»,
старший научный сотрудник Института
прикладных исследований

Ведущая организация: ФГБУН «Институт математики и механики им.
Н. Н. Красовского Уральского отделения
Российской академии наук»

Защита диссертации состоится 20 февраля 2020 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 219.005.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, гл. корпус, ауд. 625.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СибГУТИ по адресу 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86, 3 корпус, ауд. 157, а также на сайте http://www.sibsutis.ru/science/postgraduate/dis_sovets/.

Автореферат разослан «__» декабря 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Самков Тимур Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задача планирования бизнес-процессов (БП) является одной из ключевых задач управления организационными системами. К рассматриваемым БП относятся процессы выполнения проектных работ, в том числе с привлечением сторонних (субподрядных) ресурсов.

В работе рассматривается задача календарного планирования, связанная с формированием такого плана работ, который обеспечивал бы выполнение всех работ в директивные сроки с учетом возможности сдвига начала выполнения работ в заданных временных рамках. Для выполнения работ используются ограниченные складываемые и нескладываемые ресурсы. К нескладываемым ресурсам относятся ресурсы, которые допускают повторное использование после высвобождения, например, персонал. К складываемым относятся ресурсы, которые полностью расходуются в заданном объеме в процессе выполнения, например, технические объекты в процессе монтажа.

К одной из основных проблем, с которыми сталкивается при планировании лицо, принимающее решения (ЛПР), можно отнести возникновение противоречий между директивными сроками и ограничениями на нескладываемые ресурсы. Возможным решением является привлечение субподрядных ресурсов в случае недоступности собственных ресурсов. С учетом вышесказанного, целью планирования помимо соблюдения директивных сроков является снижение затрат на привлечение субподрядных (нескладываемых) ресурсов. Предприятия различных сфер деятельности сталкиваются с подобными задачами, например, производственные и проектные организации, имеющие фиксированный штат сотрудников и своевременно и гибко реагирующие на изменение спроса путем привлечения субподрядных ресурсов в случае необходимости. Время принятия решения при планировании не должно превышать критического значения для обеспечения своевременного реагирования на изменение спроса. Неэффективное планирование в подобных организациях приводит к финансовым потерям.

Таким образом, актуальной задачей является разработка метода и ИТ планирования с учетом оптимизации стоимости субподряда, наличия временных ограничений и ограничений на ресурсы складываемого и нескладываемого типа.

Степень разработанности темы исследования. 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., Кочетов Ю. А., Мезенцев Ю. А., Моудер Дж., Норенков И. П., Прилуцкий М. Х., Севастьянов С. В., Столяр А. А., Танаев В. С., Шкурба В. В., Johnson S., Hurr W., Kelley E., Pinedo M., Pritsker A. и др.

Рассматриваемая оптимизационная задача при наличии ограничений на ресурсы и директивные сроки выполнения работ в общем случае является алгоритмически сложной. Для решения подобных задач применяют либо малотрудоемкие приближенные алгоритмы, либо эвристики, сужающие пространство поиска. Применение к задаче планирования эвристических методов эволюционного моделирования рассмотрено в работах Аверченкова В. И., Емельянова В. В., Курейчика В. В., Курейчика В. М., Мышенкова К. С.,

Полетайкина А. Н., Шаповалова Т. С., Brezuliani A., Karova M., Klimek M., Okada I., Osaba E., Sriprasert E. и др. При этом в научных публикациях по теме исследования задаче оптимизации стоимости привлекаемого субподряда и учету дискретных ограниченных складуемых ресурсов не уделено должного внимания.

Таким образом, разработка метода и компьютерной технологии планирования с учетом складуемых и нескладуемых ресурсов и снижения затрат на субподрядные ресурсы на основе гибридного эвристического метода имитационно-эволюционного моделирования представляет научный и практический интерес.

Диссертационная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-37-00183 и договора № 02.G25.31.0055 (проект 2012-218-03-167).

Объектом исследования служат организационные, логистические, производственные (бизнес) процессы проектных организаций, а **предметом исследования** являются методы принятия решений в организационных системах с применением эвристического поиска в пространстве допустимых решений.

Целью диссертационной работы является разработка методов и программных средств планирования БП и проектных работ на основе имитационно-мультиагентного и эволюционного моделирования.

Для реализации цели в работе решаются следующие **задачи**:

- 1) критический анализ существующих методов, моделей и программных средств планирования работ в сложных организационных системах;
- 2) формализация задачи планирования работ с учетом минимизации субподрядных ресурсов и наличия временных и ресурсных ограничений;
- 3) разработка метода мультиагентной генетической оптимизации (МГО) планирования проектных работ на основе интеграции имитационного мультиагентного и эволюционного моделирования;
- 4) разработка алгоритмического и программного обеспечения для реализации метода МГО планирования работ.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм интеллектуального планирования, основанный на использовании мультиагентной имитационной модели распределения складуемых и нескладуемых ресурсов и эвристических правил смещения сроков начала выполнения работ с целью сдвига «узкого места» в отличие от метода критического пути (МКП) и имитационного моделирования без агентов (п. 4 Паспорта специальности 05.13.10).

2. Разработан новый метод планирования проектных работ на основе имитационно-эволюционного моделирования с учетом оптимизации затрат на привлечение нескладуемых субподрядных ресурсов в отличие от методов теории расписаний (п. 10 Паспорта специальности 05.13.10).

3. Разработана ИТ поддержки принятия решений для задачи планирования БП и проектных работ на основе интеграции имитационно-мультиагентного и эволюционного моделирования (п. 5 Паспорта специальности 05.13.10).

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод мультиагентной генетической оптимизации БП, отличающийся:

- интеграцией имитационно-мультиагентного и эволюционного подходов для задачи планирования работ, связанной с оптимизацией и динамическим распределением собственных и субподрядных ресурсов;
 - использованием модифицированного генетического алгоритма на основе алгоритмов имитации отжига и поиска новизны для проведения поиска в пространстве решений;
 - алгоритмом интеллектуального планирования, основанном на использовании мультиагентной модели распределения ресурсов и эвристических правил смещения сроков начала выполнения работ.
2. Компьютерная технология планирования работ, отличающаяся:
- гибридной архитектурой модели МГО, включающей блок оптимизации параметров модели;
 - поддержкой разработки модели МГО как непрограммирующими пользователями с помощью диалогового интерфейса интеллектуального агента, так и программирующими системными аналитиками с помощью языка управления базами данных Transact-SQL.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии теории и методов построения гибридных интеллектуальных систем поддержки принятия решений, интегрирующих имитационно-мультиагентный и эволюционный подходы.

Практическая значимость работы состоит в разработке ИТ планирования БП на базе продуктов семейства VPsim и автоматизированной системы выпуска металлургической продукции (АС ВМП). Разработанный метод и ИТ планирования БП внедрены в ООО «НПП «Системы автоматизации поддержки бизнеса» и используются в учебном процессе в Уральском федеральном университете в рамках дисциплин «Системы поддержки принятия решений» и «Системы искусственного интеллекта».

Методология и методы исследования. В работе используются методы системного анализа, аппарат продукционных систем, имитационно-мультиагентное, эволюционное и математическое моделирование, эвристические методы поиска решения (алгоритм имитации отжига, алгоритм поиска новизны, генетические алгоритмы).

Степень достоверности результатов работы. Обоснованность и достоверность результатов научной работы подтверждается следующим: привлечением формальных логических теорий для доказательства результатов исследований; результатами вычислительных экспериментов, демонстрирующих согласованность результатов применения метода МГО, эвристико-имитационного метода сдвига «узких мест» и метода перераспределения ресурсов, реализованного в MS Project, к задаче планирования; применением разработанной компьютерной технологии планирования в проектных организациях.

Апробация. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation (Madrid, Spain 2011), Международной конференции «Информационные Технологии и Системы»

(Челябинск 2012), 8th and 10th International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology (Nice, France 2013; St. Julians, Malta 2015), 10th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (Prague, Czech Republic 2018), 28 международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь 2018), Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Екатеринбург 2019).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, из них 5 статей опубликованы в журналах из списка ВАК; 5 работ – в трудах и материалах всероссийских, международных конференций; 3 работы индексируются в научных базах Scopus и Web of Science, 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Автором разработаны алгоритмы эвристико-имитационного и мультиагентного генетического планирования проектных работ, проведена модификация генетического алгоритма применением алгоритма имитации отжига и поиска новизны, предложена и апробирована ИТ мультиагентного имитационно-эволюционного моделирования для задачи планирования процессов организационных систем.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по каждой главе, заключения, списка литературы и 2 приложений. Объем работы составляет 167 страниц, в том числе основной текст на 128 страницах, список литературы на 19 страницах, приложения на 4 страницах; содержит 56 рисунков и 25 таблиц. Список литературы включает 148 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, поставлена цель работы, выделены научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассмотрена применимость к решаемой задаче следующих методов планирования: методов теории расписаний (оптимизационных алгоритмов Гимади Э. Х., Танаева В. С., Мезенцева Ю. А., Гончарова Е. Н., Севастьянова С. В.), МКП, методов имитационно-мультиагентного и эволюционного моделирования. Выявлены следующие ограничения применения к решаемой задаче планирования методов теории расписаний и МКП: 1) отсутствие поиска оптимального назначения нескладируемых ресурсов на работы с точки зрения минимизации стоимости привлекаемого субподряда; 2) отсутствие учета ограниченных складированных ресурсов (кроме алгоритма Гимади Э. Х.); 3) отсутствие учета времени жизни складированных ресурсов.

Использование имитационно-мультиагентного моделирования для решения задачи планирования позволяет преодолеть выделенные недостатки. Агентное моделирование обеспечивает учет жизненного цикла складированных ресурсов и привлечение субподрядных нескладируемых ресурсов в случае превышения доступности собственных ресурсов, что позволяет повысить адекватность разрабатываемой модели процессов. К недостаткам данного подхода следует

отнести необходимость формирования такого плана экспериментов, который содержал бы в себе эффективное решение с точки зрения снижения затрат на субподряд, что в случае полнофакторного эксперимента ресурсоемко в части машинного времени. Применение дробнофакторного эксперимента требует знания априорной информации о значимости и незначимости взаимодействий основных факторов и также ресурсоемко в части затрат машинного времени (для 35 анализируемых операций оценка числа экспериментов для поиска расписания составляет 2^{35} и 2^{10} эксперимента соответственно для полнофакторного и дробнофакторного планирования). Актуальным является применение гибридных эвристико-имитационных алгоритмов, уменьшающих пространство поиска для решения задачи планирования БП. Применение методов эволюционного моделирования, в частности генетических алгоритмов, позволяет преодолеть выделенные недостатки предыдущих методов. Анализ работ применения генетических алгоритмов к решению задачи планирования показал, что ни в одной работе не рассматривается учет и оптимизация привлекаемого субподряда.

Таким образом, сделан вывод о целесообразности разработки гибридного метода и ИТ планирования БП и проектных работ с учетом привлечения субподряда на основе имитационно-эволюционного моделирования.

Проведен анализ существующих агентных моделей динамического моделирования ситуаций: модели Курейчика В. В., модели Клейменовой Е. М. и Скобелева П. О., модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов (МППР). Определены основные требования, предъявляемые к модели формализации процессов планирования и выполнения проектных работ: 1) ориентация на моделирование дискретных процессов преобразования ресурсов; 2) наличие агентов, участвующих в управлении процессами и обладающих следующими особенностями: возможность диагностирования ситуаций согласно данным базы знаний; простота и удобство формы представления знаний в базе знаний. В результате анализа для формализации процессов планирования и выполнения работ была выбрана модель МППР, полностью отвечающая сформулированным требованиям.

Проведен сравнительный анализ наиболее распространенных инструментов создания имитационных и мультиагентных моделей (Plant Simulation, Simio, AnyLogic, VPsim), который показал, что все пакеты имеют ряд недостатков: частичная проблемная ориентация к МППР (за исключением VPsim); отсутствие средств описания эволюционной модели; отсутствие поддержки русского языка (за исключением AnyLogic и VPsim); сложность описания моделей (за исключением Simio и VPsim). Наибольшие возможности для реализации метода планирования на основе интеграции имитационно-эволюционного моделирования предлагают продукты семейства VPsim за счет поддержки технологии реализации программных помощников.

В конце главы приведена постановка задачи диссертационного исследования.

Во второй главе осуществлена постановка решаемой задачи планирования.

Пусть портфель проектов состоит из P проектов, $p = 1, \dots, P$; N_p – количество операций проекта p с индексом $i = 1, 2, \dots, N_p$; R – количество

нескладируемых трудовых ресурсов (отделов) выделенной компетенции, $r = 1, \dots, R$; R^* – количество складываемых ресурсов выделенного типа, $r^* = 1, \dots, R^*$. Обозначим множество операций проекта p следующим образом: $Pr_p = \{Op_i\}_{i=1, \dots, N_p}$. Пусть заданы времена начала и окончания составления расписания t_0 и T ; для каждого нескладируемого ресурса r задано доступное количество Q_r ; для каждого складываемого ресурса r^* задано начальное количество Q_{t_0, r^*} . Пусть для каждой операции i проекта p определены следующие характеристики: время выполнения $d_{p,i} \geq 0$; требуемое количество нескладируемых ресурсов выделенной компетенции $q_{p,i,r} \geq 0$; потребляемое в момент начала операции и производимое в момент окончания операции количество складываемых ресурсов заданного типа $q_{p,i,r^*}^- \leq 0$ и $q_{p,i,r^*}^+ \geq 0$ соответственно; стоимость одного дня выполнения операции единичным количеством нескладируемого ресурса выделенной компетенции $s_{p,i,r} \geq 0$; раннее и позднее времена начала операции $\tau_{p,i}^0 \geq 0$ и $\tau_{p,i}^1 \geq 0$, которые задают ограничения на время начала операции $x_{p,i}$. Без ограничения общности будем считать, что набор операций для каждого проекта p упорядочен по возрастанию стоимости $s_{p,i,r}$.

Требуется найти расписание портфеля проектов, задаваемое временами старта всех операций $x_{p,i}$, $p = 1, 2, \dots, P$, $i = 1, 2, \dots, N_p$, $x_{p,i} \in \mathbb{Z}^+$, $\mathbb{Z}^+ = \{0, 1, 2, \dots\}$.

Обозначим множество индексов операций, выполняемых в момент времени $t \geq t_0$ и использующих ресурс r следующим образом:

$$I(t, r) = \{i = 1, \dots, m \mid x_{p,i} \leq t < x_{p,i} + d_{p,i} \ \& \ q_{p,i,r} \neq 0 \ \& \ Op_i \in Pr_p \ \& \ p \in [1, P]\}. \quad (1)$$

В каждый момент времени t для каждого из нескладируемых ресурсов компетенции r возможны следующие ситуации: 1) $\sum_{p \in [1, P]} \sum_{i \in I(t, r)} q_{p,i,r} \leq Q_r$ – в случае выполнения в момент времени t всех операций с индексом $i \in I(t, r)$ собственным ресурсом компетенции r ; 2) $\sum_{p \in [1, P]} \sum_{i \in I(t, r)} q_{p,i,r} > Q_r$ – в случае привлечения в момент времени t дополнительного (субподрядного) количества ресурса компетенции r для выполнения операций с индексом $i \in I(t, r)$.

Обозначим множество индексов операций, выполняемых в момент $t \geq t_0$ и использующих собственный ресурс r в пределах доступного количества Q_r :

$$I^{\sim}(t, r) = \{i = 1, \dots, m^{\sim} \mid i \in I(t, r) \ \& \ \sum_{p \in [1, P]} \sum_i q_{p,i,r} \leq Q_r\}. \quad (2)$$

Тогда множество индексов операций, выполняемых в момент времени $t \geq t_0$ и использующих субподрядный ресурс r , определим следующим образом:

$$I^*(t, r) = \{i = 1, \dots, m^* \mid i \in I(t, r) \ \& \ i \notin I^{\sim}(t, r)\}. \quad (3)$$

Простой в процентах собственных ресурсов компетенции r при выполнении проекта p в момент времени t будем рассчитывать по формуле:

$$Z_{p,t,r} = \begin{cases} (1 - \sum_{i \in I^{\sim}(t,r)} q_{p,i,r} / Q_r) \cdot 100\%, & i \in I^{\sim}(t, r) \ \& \ Op_i \in Pr_p, \\ 0\%, & i \in I^*(t, r) \ \& \ Op_i \in Pr_p. \end{cases} \quad (4)$$

Загруженность в процентах отдела r , выполняющего проект p в момент времени t , определим следующим образом: $U_{p,t,r} = 100\% - Z_{p,t,r}$.

Стоимость привлекаемого субподряда компетенции r для выполнения проекта p в момент времени t будем рассчитывать по формуле:

$$SC_{p,t,r} = \sum_{i \in I^*(t,r)} s_{p,i,r} q_{p,i,r}. \quad (5)$$

Текущий объем складированного ресурса r^* в момент t определим как:

$$Q_{t,r^*} = Q_{t_0,r^*} + \sum_{t'=t_0}^t \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{i \in I(t',r^*) \\ \wedge(t'=x_{p,i})}} q_{p,i,r^*}^- + \sum_{t'=t_0}^t \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{i \in I(t',r^*) \\ \wedge(t'=x_{p,i}+d_{p,i})}} q_{p,i,r^*}^+ \quad (6)$$

Задача планирования проектных работ формализуется следующим образом:

$$\sum_{p=1}^P \sum_{t=t_0}^T \sum_{r=1}^R SC_{p,t,r} \rightarrow \min \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{\substack{i \in I(t,r^*) \\ \wedge(t=x_{p,i})}} |q_{p,i,r^*}^-| \leq Q_{t,r^*}, t = t_0, \dots, T, r^* = 1, \dots, R^* \quad (8)$$

$$\tau_{p,i}^0 \leq x_{p,i} \leq \tau_{p,i}^1, p = 1, \dots, P, i = 1, \dots, N_p, x_{i,p} \in \mathbb{Z}^+ \quad (9)$$

Целевая функция (7) минимизирует суммарную стоимость на портфель проектов привлекаемых субподрядных ресурсов в случае превышения доступности собственных нескладированных ресурсов. Ограничение (8) обеспечивает наличие необходимого объема складированных ресурсов на момент начала выполнения каждой из операций, требующих использования складированных ресурсов. Ограничение (9) накладывает временные рамки на даты начала выполнения операций.

С помощью модели МППР формализована задача планирования проектных работ с учетом потребления и производства складированных ресурсов и использования нескладированных (трудовых) ресурсов (собственных и субподрядных). Агент в модели МППР представляет собой модель ЛПР (менеджера проекта), знания которого относительно распределения ресурсов формализуются с помощью продукционных правил. Также модель МППР включает агента материально-технического обеспечения, который контролирует текущий объем и время жизни складированных ресурсов и следит за выполнением ограничения (8) путем формирования заявок на производство (закупку) необходимого количества складированного ресурса в случае снижения его текущего объема до критического значения или превышения времени жизни ресурса.

На основе описанной модели МППР разработан эвристико-имитационный метод поиска приемлемого календарного плана работ. Работа метода заключается в выполнении шагов: 1) проведение эксперимента с моделью МППР; 2) поиск алгоритмом интеллектуального планирования узких мест, связанных с операциями, требующими высоких затрат на привлечение субподряда; 3) смещение дат начала выделенных операций на интервалы, определяемые алгоритмом интеллектуального планирования; 4) передача скорректированной модели на стадию проведения экспериментов и оценка их результатов; 5) в случае приемлемых результатов окончание работы метода, иначе переход на шаг 2.

Рассмотрим алгоритм интеллектуального планирования. Пусть n – итерационный шаг поиска, $n \in \mathbb{N}$.

$M_{p,i,r}(n) = [a; b]$ – временной интервал с длительностью $c_{p,i,r} = b - a$, на котором загруженность отдела r , выполняющего операцию i , $U_{p,i,r}^0(n) = 100\%$;

$M_{p,i,r}^-(n) = [(a - (n + 1) \cdot c_{p,i,r}); (a - n \cdot c_{p,i,r})]$ – временной интервал $M_{p,i,r}(n)$, смещенный на $(n + 1) \cdot c_{p,i,r}$ дней влево по оси времени и удовлетворяющий условию: $U_{p,i,r}^-(n) \neq U_{p,i,r}^0(n)$;

$U_{p,i,r}^-(n)$ – средняя загруженность отдела r , выполняющего операцию i проекта p на временном интервале $M_{p,i,r}^-(n)$, которая определяется по формуле:

$$U_{p,i,r}^-(n) = \sum_{t=a-(n+1) \cdot c_{p,i,r}}^{a-n \cdot c_{p,i,r}} U_{p,t,r} / c_{p,i,r}; \quad (10)$$

$M_{p,i,r}^+(n) = [(b + n \cdot c_{p,i,r}); (b + (n + 1) \cdot c_{p,i,r})]$ – временной интервал $M_{p,i,r}(n)$, смещенный на $(n + 1) \cdot c_{p,i,r}$ дней вправо по оси времени и удовлетворяющий условию: $U_{p,i,r}^+(n) \neq U_{p,i,r}^0(n)$;

$U_{p,i,r}^+(n)$ – средняя загруженность отдела r , выполняющего операцию i проекта p на временном интервале $M_{p,i,r}^+(n)$, которая определяется по формуле:

$$U_{p,i,r}^+(n) = \sum_{t=b+n \cdot c_{p,i,r}}^{b+(n+1) \cdot c_{p,i,r}} U_{p,t,r} / c_{p,i,r}. \quad (11)$$

Алгоритм интеллектуального планирования включает в себя шаги:

1. Проведение эксперимента с моделью МППР, на вход которой подаются даты начала операций $x_{p,i}$. Формирование значений выходных параметров модели МППР: для каждого момента t каждого проекта p определение множества операций $Op_i \in Pr_p$ с индексами $i \in I^*(t, r)$, выполняемых в момент t и использующих субподрядный ресурс r , для каждой операции формирование затрат на субподряд $s'_{p,i,r} = s_{p,i,r} q_{p,i,r}$; для каждого отдела r формирование загруженности отдела $U_{p,t,r}$ по выполнению проекта p ; для каждого складированного ресурса r^* формирование функции зависимости текущего объема Q_{t,r^*} от времени. Задание $p = 1$.
2. Определение для проекта p набора операций с индексом $i = 1, \dots, N'$, $N' \leq N_p$, для которых затраты на субподряд $s'_{p,i,r}$ превышают заданный порог $\Theta_{p,i,r}$. Если $N' \neq 0$, то задание $i = 1, n = 1$ и переход на п.3, иначе переход на п.6.
3. Определение компетенции r ресурса, выполняющего операцию i проекта p . Выделение для операции временного отрезка $L_{p,i} = [x_{p,i}; x_{p,i} + d_{p,i}]$.
4. Если существует отрезок $M_{p,i,r}(n) \subset L_{p,i}$, то переход на п.7, иначе на п.5.
5. Если $(i + 1) < N'$, то задание $i = i + 1$ и переход на п.3, иначе переход на п.6.
6. Если $(p + 1) < P$, то задание $p = p + 1$ и переход на п.2, иначе переход на п.14.
7. Расчет загруженностей $U_{p,i,r}^-(n)$ и $U_{p,i,r}^+(n)$ для отрезков $M_{p,i,r}^-(n)$ и $M_{p,i,r}^+(n)$.
8. Если $U_{p,i,r}^-(n) < U_{p,i,r}^+(n)$, то переход на п.9, иначе переход на п.10.

9. Если $\tau_{p,i}^0 \leq (x_{p,i} - c_{p,i,r} \cdot (n + 1))$ (проверка ограничения (9)), то смещение начала выполнения ресурсом r операции i проекта p : $x_{p,i} = x_{p,i} - c_{p,i,r} \cdot (n + 1)$ и переход на п.1, иначе переход на п.5.
10. Если $U_{p,i,r}^-(n) > U_{p,i,r}^+(n)$, то переход на п.11, иначе переход на п.12.
11. Если $(x_{p,i} + c_{p,i,r} \cdot (n + 1)) \leq \tau_{p,i}^1$, то смещение начала выполнения ресурсом r операции i проекта p : $x_{p,i} = x_{p,i} + c_{p,i,r} \cdot (n + 1)$ и переход на п.1, иначе на п.5.
12. Если $U_{p,i,r}^-(n) = U_{p,i,r}^+(n)$ и $U_{p,i,r}^-(n) \neq U_{p,i,r}^0(n)$, то переход на п.9, иначе переход на п.13.
13. Задание $n = n + 1$ и переход на п.7.
14. Конец.

Качество решения будем определять по значению функции (7) при соблюдении ограничений (8) – (9) в сравнении с оптимальным значением данной функции, которое равно нулю.

Предложенный алгоритм интеллектуального планирования в рамках работы эвристико-имитационного метода осуществляет сдвиг начала выполнения операции с фиксированным шагом с целью устранения узкого места на ограниченных нескладируемых ресурсах для операций с высокими затратами на привлекаемый субподряд. При этом возможны ситуации, когда временные ограничения (9) не выполняются, вследствие чего сдвиг не осуществляется, и узкое место сохраняется. Для устранения узких мест за счет сдвига операций на различные временные интервалы, в пределах допустимых ограничениями (9), предлагается применять гибридный метод имитационно-эволюционного моделирования, реализуемый в новом методе мультиагентной генетической оптимизации (МГО).

Метод МГО интегрирует имитационное и эволюционное моделирование по схеме, предложенной в работе Курейчика В. В.¹ и его коллег и расширенной методом мультиагентного моделирования и модификацией применяемого генетического алгоритма (ГА).

ГА модифицирован с целью повышения скорости сходимости алгоритма и качества найденного решения задачи. Модификация осуществляется путем интеграции ГА с алгоритмами имитации отжига и поиска новизны. В рамках работы модифицированного ГА применяются три стратегии поиска решения для оператора кроссинговера (скрещивания хромосом): случайный поиск, поиск экстремума и разработанная стратегия поиска оригинальности. Алгоритм имитации отжига предназначен для комбинации предложенных стратегий; параметр алгоритма t_Q линейно возрастает при увеличении номера поколения и участвует в формировании динамических вероятностей выбора хромосом-родителей для оператора кроссинговера.

Обозначим вероятность выбора хромосомы Ch_i из популяции при применении стратегии случайного поиска (ССП) как $p_i^{ССП}$, а вероятность выбора хромосомы при применении стратегии поиска экстремума (СПЭ) – $p_i^{СПЭ}$.

¹ Курейчик В. В. Теория эволюционных вычислений / В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, С. И. Родзин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 260 с.

Последняя вероятность рассчитывается с помощью применения закона рулетки к значению функции пригодности хромосомы. Вероятность выбора хромосомы Ch_i из популяции в пару к хромосоме Ch_j при применении разработанной стратегии поиска оригинальности (СПО) определим с помощью применения закона рулетки к значению расстояния Хемминга h_{ij} между хромосомами. Данное расстояние рассчитывается как количество позиций с несовпадающими значениями генов в хромосомах.

Вероятность выбора первого родителя в поколении Q должна учитывать как случайный характер выбора, так и целенаправленный выбор на основе стратегии поиска экстремума. При этом вероятность случайного выбора должна снижаться при эволюции поколений, а вероятность применения СПЭ – возрастать. С учетом вышесказанного определим вероятность выбора родителя i в поколении Q :

$$P_i^Q(OK) = p_i^{\text{СП}} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right)\right) + p_i^{\text{СПЭ}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right). \quad (12)$$

Вероятность выбора второго родителя должна учитывать предложенные стратегии поиска оригинальности и поиска экстремума, при этом вероятность применения СПО должна снижаться при эволюции поколений, а вероятность применения СПЭ – возрастать. С учетом вышесказанного определим вероятность выбора родителя j для родителя i в поколении Q следующим образом:

$$P_j^Q(OK) = p_{ij}^{\text{СПО}} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right)\right) + p_j^{\text{СПЭ}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{t_Q}\right). \quad (13)$$

Предложенный метод МГО позволяет проводить поиск решения поставленной задачи планирования работ. Модель МППР предназначена для оценки функции пригодности решений в ходе работы ГА. Управляемые параметры (даты начала выполнения операций проектов $x_{p,i}$) и начальные параметры, описанные при постановке задачи, подаются на вход модели МППР. Параметры, формируемые в процессе принятия решений, являются выходами модели: стоимость привлечения субподрядных ресурсов и простой собственных ресурсов каждой компетенции. В модели МППР агенты применяются для реализации алгоритма распределения складировуемых и нескладировуемых ресурсов и учета ограничений на складировуемые ресурсы (8), а имитационное моделирование – для описания выполнения операций.

Проведен сравнительный анализ нового метода планирования (МГО) и следующих методов: МКП, метода Гимади Э. Х., метода Клейменовой Е. М. и Скобелева П. О., метода Курейчика В. В.. В результате анализа сделан следующий вывод: наибольшей функциональностью для решения рассматриваемой задачи планирования с учетом складировуемых и нескладировуемых ресурсов и минимизации стоимости субподрядных работ обладает метод МГО. К недостаткам метода МГО можно отнести отсутствие механизмов минимизации длины расписания и отсутствие учета функции непрерывного потребления (производства) складировуемых ресурсов. Данные недостатки связаны с ограничениями и спецификой анализируемой предметной области: дискретностью рассматриваемых БП и наличием временных рамок выполнения проектов, в связи с чем плотная упаковка работ по проекту не требуется.

Полученные теоретические результаты (метод МГО для задачи планирования проектных работ) позволяют реализовать программное обеспечение, относящееся к классу интеллектуальных систем принятия решений, которое использует методы имитационного мультиагентного и эволюционного моделирования.

В третьей главе на основе вышеизложенных методов решения задачи планирования проектных работ и концептуальной модели МППР представлены принципы создания и технические решения: 1) разработанной ИТ мультиагентной генетической оптимизации на базе продуктов семейства VPsim; 2) разработанной ИТ имитационно-эволюционного моделирования, реализованной в АС ВМП.

Создание ИТ МГО потребовало разработки: диалоговых интерфейсов шагов выполнения методов решения задачи; интерфейса интеграции имитационной модели и ИТ генетической оптимизации; программного, информационного, алгоритмического, математического и методического обеспечения ИТ; технологии работы с программной системой. За основу построения ИТ МГО была взята система технико-экономического проектирования VPsim.MSN; разработка велась с помощью технологии проектирования интеллектуальных агентов на базе диаграмм последовательности UML с применением языка управления базами данных Transact-SQL и графического конструктора форм пользовательского интерфейса. ИТ МГО работает с базой данных MS SQL Server системы VPsim.MAS, что обеспечивает программную интеграцию методов мультиагентного и эволюционного моделирования.

Разработка ИТ имитационно-эволюционного моделирования в системе АС ВМП велась с помощью реализации алгоритма МГО с использованием языка программирования Java и инструмента Oracle Database 11g Enterprise Edition.

В четвертой главе представлены результаты моделирования и поиска решения задач планирования работ: 1) для задачи календарного планирования в проектной организации ЗАО «Телесистемы»; 2) для задачи планирования бизнес-процессов в рамках опытной эксплуатации системы АС ВМП.

В рамках решения задачи планирования для ЗАО «Телесистемы» разработана модель МППР исполнения работ по портфелю проектов с динамическим распределением ресурсов (собственных и субподрядных) по операциям проектов. Показано повышение адекватности модели при переходе от имитационного моделирования без агентов к мультиагентному моделированию.

Применение ИТ МГО позволило определить эффективный календарный план работ с учетом минимизации издержек предприятия на оплату привлечения сторонних трудовых ресурсов. Проведена оценка качества решений, полученных с помощью разработанных методов планирования (эвристико-имитационного и МГО) в сравнении с решениями для базового календарного плана и метода перераспределения ресурсов MS Project. Показана непригодность метода перераспределения ресурсов MS Project, поскольку данный метод не позволяет учитывать директивные сроки (9) начала выполнения работ. Использование метода МГО позволило повысить качество решения на 30% по сравнению с использованием эвристико-имитационного метода, а также повысить качество решения в 6,7 раза по сравнению с начальным календарным планом работ.

Экономический эффект от внедрения найденного с помощью ИТ МГО плана работ на предприятии ЗАО «Телесистемы» составил 390 000 рублей в год.

В рамках опытной эксплуатации ИТ имитационно-эволюционного моделирования модуля оптимизации процессов системы АС ВМП были решены следующие задачи планирования БП: задача планирования организационных процессов, направленных на устранение инцидентов; задача планирования организационных процессов телекоммуникационного сопровождения. Выявленные практические рекомендации согласуются с данными, полученными при выполнении БП.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

Приложения содержат копии актов внедрения, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключении приводятся следующие основные результаты работы.

1. Поставлена задача планирования работ с учетом оптимизации затрат на привлечение субподрядных нескладируемых ресурсов, ограниченных складированных ресурсов и директивных сроков выполнения.

2. Разработан алгоритм интеллектуального планирования, основанный на использовании мультиагентной имитационной модели распределения складированных и нескладируемых ресурсов и эвристических правил смещения сроков начала выполнения работ.

3. Разработан метод МГО на основе интеграции генетических алгоритмов и имитационного моделирования по схеме Курейчика В.В., расширенной применением мультиагентного моделирования и стратегией поиска оригинальности на основе алгоритмов имитации отжига и поиска новизны.

4. На основе метода МГО были разработаны: ИТ планирования БП в системе моделирования VPsim и модуль оптимизации процессов предприятия системы АС ВМП. Разработанные технологии предназначены для решения задачи календарного планирования с учетом оптимизации стоимости субподряда и поддержки работы как непрограммирующих специалистов (менеджеров проектов), так и бизнес-аналитиков, владеющими навыками программирования.

5. Разработанная ИТ планирования совместно с комплексом VPsim внедрена в ООО «НПП «Системы автоматизации поддержки бизнеса» и используется в учебном процессе в Уральском федеральном университете.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследований. Одним из направлений совершенствования разработанного гибридного метода планирования БП является решение многокритериальной задачи поиска расписания, оптимального с точки зрения длины расписания и стоимости привлекаемых сторонних трудовых ресурсов. Кроме того, необходима дальнейшая апробация предложенного метода и ИТ планирования для решения реальных задач планирования БП с последующим анализом качества получаемых решений и выработкой рекомендаций по настройке параметров модифицированного ГА, применяемого в ходе работы метода.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Антонова, А. С. Реализация эволюционно-имитационного алгоритма оптимизации процессов в системе моделирования производственных процессов металлургического предприятия [Электронный ресурс] / А. С. Антонова, К. А. Аксенов, С. Д. Ростунцев, А. И. Рудь // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/122-21220>.

2. 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.

3. Антонова, А. С. Применение мультиагентного и эволюционного моделирования при планировании работ / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – № 6 (186). – С. 126–136.

4. Антонова, А. С. Генетическая оптимизация при решении задачи планирования проектных работ [Электронный ресурс] / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-7409>.

5. Аксенов, К. А. Применение имитационного моделирования и технологии интеллектуальных агентов для решения задачи управления проектами / К. А. Аксенов, А. С. Антонова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – № 4 (128). – С. 27–36.

Публикации в изданиях, индексируемых в системе Scopus:

6. Aksyonov, K. A. Development of a hybrid decision-making method based on a simulation-genetic algorithm in a web-oriented metallurgical enterprise information system / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova // Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous and Future Networks. – 2018. – P. 197–202.

7. 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.

8. Aksyonov, K. A. Tools and methodologies for business processes formalization: application to multi-agent systems / K. A. Aksyonov, E. A. Bykov, A. S. Antonova, O. P. Aksyonova, E. M. Sufrygina, N. V. Goncharova // Proceedings of the 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation. – 2011. – P. 113–118.

Публикации в сборниках научных трудов:

9. Аксенов, К. А. Применение автоматизированной системы выпуска металлургической продукции для анализа логистических процессов / К. А. Аксенов, А. С. Антонова // Пленарные доклады Девятой всероссийской научно-

практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». – Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2019. – С. 96–116.

10. Антонова, А. С. Применение эволюционно-имитационного алгоритма для решения задачи параметрического синтеза процесса преобразования ресурсов / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // 28 международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2018. – С. 443–447.

11. Aksyonov, K. A. Application of a models integration module to the cutting slabs problem in a continuous casting machine / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova, E. F. Smoliy, E. G. Sysoletin, A. A. Sheklein // Proceedings of The Tenth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology. – 2015. – P. 65–72.

12. Aksyonov, K. A. Multiagent genetic optimisation to solve the project scheduling problem / K. A. Aksyonov, A. S. Antonova // Proceedings of The Eighth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology. – 2013. – P. 237–242.

13. Аксенов, К. А. Анализ моделей динамического моделирования ситуаций применительно к исследованию организационно-технических систем / К. А. Аксенов, А. С. Антонова // Материалы международной научной конференции «Информационные Технологии и Системы 2012». – Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2012. – С. 85–87.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

14. 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.

15. Модуль планирования имитационного эксперимента модели процесса преобразования ресурсов «Планировщик»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / К. А. Аксенов, А. С. Антонова, О. П. Аксенова, В. Кай, А. Л. Неволлина. – № 2013615160; дата регистрации 29.05.2013 г.